

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность): 18.05.02 Химическая технология материалов современной энергетики

Отделение: «Ядерно-топливного цикла»

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Тема работы
Проект участка волоксидации облученного ядерного топлива производительностью 100 тонн в год

УДК 621.039.59:621.039.54

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0451	Шутова Софья Константиновна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Карелин Владимир Александрович	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Гузырь Владимир Васильевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

По разделу «Автоматизация процесса»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Кузьмина Анна Владимировна	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Леонова Лилия Александровна	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 18.05.02
«Химическая технология материалов современной энергетики»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Демонстрировать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания и детальное понимание научных принципов профессиональной деятельности
P2	Ставить и решать инновационные задачи, связанные с получением и переработкой материалов и изделий ядерного топливного цикла, с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии материалов современной энергетики
P3	Эксплуатировать и совершенствовать действующие, разрабатывать и внедрять новые современные высокотехнологичные процессы и линии автоматизированного производства, обеспечивать их высокую эффективность, контролировать расходование сырья, материалов, энергетических затрат
P4	Обеспечивать радиационную безопасность, соблюдать правила охраны здоровья и труда при проведении работ, выполнять требования по защите окружающей среды; оценивать радиационную обстановку; осуществлять контроль за сбором, хранением и переработкой радиоактивных отходов различного уровня активности с использованием передовых методов обращения с РАО
P5	Уметь планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования в области изучения свойств и технологии материалов современной энергетики с использованием новейших достижений науки и техники, уметь обрабатывать и критически оценивать полученные данные, делать выводы, формулировать практические рекомендации по их применению; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности
P6	Разрабатывать новые технологические схемы, рассчитывать и выбирать оборудование, применять средства автоматизации, анализировать технические задания и проекты с учетом ядерного законодательства
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Представлять современную картину мира на основе целостной системы естественнонаучных и математических знаний, ориентироваться в ценностях бытия, жизни, культуры; иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем
P8	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области изучения свойств, методов и технологий получения и переработки материалов современной энергетики
P9	Применять иностранный язык в сфере коммуникаций и профессиональной деятельности, представлять результаты научных исследований и разработок в виде отчетов, публикаций, публичных обсуждений

P10	Уметь эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, руководить командой, быть способным оценивать, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность; следовать корпоративной культуре организации, кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность): 18.05.02 Химическая технология материалов современной энергетики

Отделение: «Ядерно-топливного цикла»

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ОЯТЦ
 _____ А.Г. Горюнов
 (Подпись)(Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

дипломного проекта

Студенту:

Группа	ФИО
0451	Шутовой Софье Константиновне

Тема работы:

Проект участка волоксации облученного ядерного топлива производительностью 100 т/год	
Утверждена приказом директора от 14.12.2020 г.	№ 349-54/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29 декабря 2020 года
--	----------------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Проектируется непрерывный процесс волоксации облученного ядерного топлива (ОЯТ), производительность по ОЯТ – 100 т/год. Режим работы – непрерывный. Состав исходного топлива: UO_2 – 955,6 кг/т, PuO_2 – 8,9 кг/т, NpO_2 – 0,5 кг/т, Cs_2O – 4,1 кг/т, SrO – 1,63 кг/т и др. При волоксации ОЯТ необходимо обеспечить радиационную безопасность проведения процесса.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p>	<p>1. Введение 2. Обзор литературы 3. Расчеты и аналитика 3.1. Разработка и описание аппаратурно-технологической схемы. 3.2. Расчёт материального баланса технологической схемы 3.3. Расчёт теплового баланса технологической схемы 3.4. Расчёт основного аппарата. 3.4.1. Расчёт геометрии и габаритов основного аппарата 3.4.2. Механический расчёт основного аппарата</p>

	3.4.3. Гидравлический расчёт основного аппарата 3.4.4. Энергетический расчёт основного аппарата 4. Результаты расчетов 5. План размещения оборудования 5.1. Подбор основного технологического оборудования 5.2. Расчёт геометрии и габаритов оборудования 5.3. Энергетический расчёт технологической схемы 5.4. План размещения оборудования 6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 7. Социальная ответственность 8. Автоматизация процесса 9. Заключение 10. Список использованных источников
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	1. Сборочный чертёж основного аппарата А1 (ГОСТ 2.001-93...2.034-83). 2. Аппаратурно-технологическая схема 3. Блок-схема с материальными потоками 4. План размещения оборудования 5. Экономическая часть 6. Автоматизация процесса 7. Презентация Power Point Presentation
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гузырь В.В., доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Передерин Ю.В., доцент ОЯТЦ ИЯТШ
Автоматизация процесса	Кузьмина А.В., доцент ОЯТЦ ИЯТШ
Нормоконтролёр	Страшко А.Н., доцент ОЯТЦ ИЯТШ
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
-	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	12.10.2020 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Карелин В.А.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0451	Шутова С.К.		

Реферат

Дипломный проект на тему «Проект участка волоксации облученного ядерного топлива производительностью 100 тонн в год» содержит 136 страниц, 9 рисунков, 29 таблиц, 67 использованных источника информации, 125 формул, 5 листов графического материала формата А1, один лист – формата А0.

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо, облученное ядерное топливо, волоксация, аппарат кипящего слоя, окисление.

Объектом исследования является технология волоксации облученного ядерного топлива.

Основные задачи дипломного проекта:

1. Проведение аналитического обзора процесса волоксации;
2. Расчет материального и теплового балансов;
3. Расчет основного аппарата – реактора волоксации с «псевдооживленным слоем»;
4. Подбор основного и вспомогательного оборудования, составление плана размещения оборудования;
5. Разработка схемы автоматизации производства;
6. Проведение технико-экономических расчетов участка волоксации;
7. Составление мероприятий по социальной ответственности.

Оглавление

Введение.....	11
1 Обзор литературы	13
1.1 Состав и характеристики ОЯТ.....	14
1.2 Теория процесса волоксидации	18
1.3 Аппаратурное оформление волоксидации	24
2 Расчеты и аналитика	30
2.1 Аппаратурно-технологическая схема	31
2.2 Термодинамика и кинетика волоксидации.....	36
2.3 Материальный расчет	38
2.4 Тепловой расчет	46
2.5 Аппаратурный расчет	55
2.6 Гидравлический расчет.....	59
2.7 Механический расчет	61
3 Результаты расчетов	68
4 План размещения оборудования	69
4.1 Подбор основного технологического оборудования	69
4.2 Энергетический расчет технологической схемы.....	74
4.3 Размещение оборудования	75
5 Автоматизация процесса	76
5.1 Описание схемы автоматизации.....	77
5.2 Перечень параметров, подлежащих контролю, регулированию и сигнализации	81
5.3 Подбор первичных преобразователей	83
5.4 Автоматизация процесса с использованием ЭВМ	84
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..	86
6.1 Расчет производственной мощности	86
6.2 Расчет затрат на объект	88
6.3 Расчет затрат на оборудование	90
6.4 Расчет затрат на заработную плату персонала.....	91

6.5 Расчет эксплуатационных затрат.....	97
6.6 Расчет затрат на приобретение исходных веществ	100
6.7 Калькуляция стоимости производства.....	100
6.8 Выводы по главе 6.....	102
7 Социальная ответственность	103
7.1 Анализ вредных и опасных факторов производства	103
7.2 Радиационная безопасность	104
7.3 Ядерная безопасность	109
7.4 Санитарно-гигиенические мероприятия.....	112
7.5 Электробезопасность	113
7.6 Защита от механического травмирования	115
7.7 Защита от шума и вибрации.....	116
7.8 Пожарная безопасность	117
7.9 Производственное освещение	119
7.10 Вентиляция	121
7.11 Микроклимат	122
7.12 Возможные аварийные ситуации	123
7.13 Выводы по главе 7.....	125
Заключение	127
Список использованных источников	129

Введение

Целью данной работы является разработка проекта участка волоксации облученного ядерного топлива (ОЯТ). Волоксация является важной частью радиохимической переработки ОЯТ, которая необходима для осуществления концепции «замкнутого» ядерного топливного цикла. Такая организация процесса выделения энергии на атомной электростанции (АЭС) имеет явные преимущества по сравнению с концепцией с «открытым» циклом, хотя и является более сложной в эксплуатации и более дорогостоящей на этапе строительства и пуска. «Замыкание» цикла подразумевает собой зацикливание ядерного топлива: его неоднократную переработку и очистку от наработанных продуктов деления, повторное использование невыгоревшего урана и наработанного плутония. Если использовать данную схему, получится снизить количество радиоактивных отходов (РАО) от переработки ОЯТ, а также обеспечить автономность производства энергии на основе ядерного уранового топлива. В настоящее время данной проблемой занимаются в рамках проекта «Прорыв» на базе предприятия ФЯО ФГУП «Горно-химический комбинат», г. Железногорск, а также на других предприятиях Госкорпорации «Росатом».

Данная тема в настоящее время является актуальной. Хорошо продуманная технологическая организация процесса волоксации позволит увеличить процент перевода урана из ОЯТ в раствор на стадии растворения. Частичное окисление урана в процессе волоксации до степени окисления (+6) позволит снизить необходимое количество кислоты для растворения, что напрямую влияет на количество образующихся высокоактивных отходов (ВАО). Также проведение волоксации позволит отделить высокорadioактивные летучие продукты деления от топлива на начальном этапе его переработки, что снизит общую радиоактивность поступающего на дальнейшую переработку материала. Таким образом, можно сделать вывод о том, что стадия волоксации в переработке ОЯТ занимает важное место. Наряду с основными стадиями, такими как растворение или

экстракция, волоксияция будет напрямую влиять на эффективность всей переработки ОЯТ.

Для выполнения данного проекта рассмотрена теория процесса волоксияции, который представляет собой окисление топливного диоксида урана кислородом или другими реагентами-окислителями до октаоксида триурана. В процессе окисления изменяется не только химический состав ОЯТ, но и его структура, что упрощает дальнейшую переработку топлив. Также рассмотрены подготовительные операции процесса волоксияции и операции по последующей очистке газовой фазы, участвующей в окислении. Рассмотрены варианты аппаратурного оформления волоксияции, оно может быть представлено различными аппаратами в зависимости от пути проведения процесса, а именно в зависимости от подготовки топливных сборок и топливных элементов к этапу окисления.

1 Обзор литературы

Волоксияция ОЯТ – сложный гетерогенный процесс на границе фаз газ-твёрдое. Для того чтобы правильно подобрать оборудование для его проведения, необходимо рассмотреть более подробно несколько аспектов процесса.

Во-первых, необходимо рассмотреть возможный состав и характеристики ОЯТ для расчета количества окислителя, затрачиваемого на процесс. Также состав облученного топлива будет напрямую влиять на ограничения по ядерной безопасности, то есть на объем основного и вспомогательного оборудования, а также конструкционные материалы, из которых оборудование будет изготовлено. Так же от активности и тепловыделения топлива будут зависеть меры, принимаемые для защиты производственного персонала от излучения.

Во-вторых, очень важно рассмотрение физико-химических факторов процесса окисления. Для того чтобы окисление проходило с большим выходом, необходимо учесть теоретические основы процесса, включая необходимую температуру, давление и другие факторы.

В-третьих, на процесс волоксияции будет влиять стадия, предшествующая ей – отделение топливных таблеток от металлической оболочки. От данного этапа будет зависеть форма ОЯТ, поступающая на стадию окисления.

В-четвертых, необходимо рассмотреть последующую очистку воздуха, участвующего в волоксияции. Необходимо предусмотреть очистку воздуха от радиоактивной пыли и летучих продуктов деления перед его выводом в атмосферу.

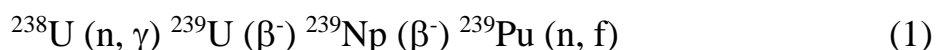
После того как будут рассмотрены четыре вышеописанных аспекта, напрямую влияющих на процесс, можно будет подобрать основное необходимое оборудование для проведения волоксияции, а также

дополнительное оборудование по газоочистке и улавливанию окисленных частиц ОЯТ.

1.1 Состав и характеристики ОЯТ

ОЯТ – облученное ядерное топливо, представляет собой в общем виде невыгоревшее ядерное топливо, наработанный плутоний и продукты деления, в том числе нейтронные яды.

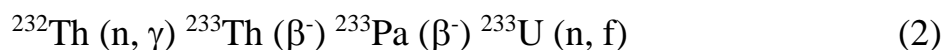
Если в ядерном топливе в качестве делящегося материала используется ^{235}U , а в качестве воспроизводящего – ^{238}U , то такое топливо называют урановым. В нём в результате побочной реакции из ^{238}U образуется ^{239}Pu [1]:



Урановое топливо может быть изготовлено из природного урана (0,7 % ^{235}U), низкообогащенного урана (1-5 % ^{235}U) и высокообогащенного урана (до 93 % ^{235}U). От первоначального обогащения топлива будет зависеть количество урана-235, содержащегося в ОЯТ. Так в ОЯТ из топлива на природном уране остается только 0,2-0,3 % ^{235}U , в ОЯТ из низкообогащенного по урану-235 топлива – 1 % ^{235}U , а в ОЯТ из высокообогащенного топлива более 1 % ^{235}U . Повторное обогащение производят для низкообогащенного и высокообогащенного топлива по ^{235}U , топливо из природного урана не обогащается повторно, уран, содержащийся в нем, может быть использован в качестве воспроизводящего в реакторах на быстрых нейтронах.

В реакторах на быстрых нейтронах может быть использовано уран-плутониевое топливо, в котором в качестве делящегося нуклида используется ^{239}Pu , а в качестве воспроизводящего – ^{238}U или природный уран. Такое топливо обеспечивает максимально полное использование урановых ресурсов и расширенное воспроизводство делящегося материала [1].

Существует также уран-ториевое топливо, в котором в качестве делящегося нуклида используют ^{235}U или ^{233}U , а в качестве воспроизводящего – ^{232}Th [1]:



В настоящее время такое топливо не используется в промышленности, но рассматривается как перспективное.

От вида топлива будет зависеть содержание различных актиноидов в ОЯТ, например, ^{235}U и ^{239}Pu .

Радиохимическая переработка ОЯТ напрямую зависит от исходных его характеристик, а именно от химического и радиохимического состава, содержания делящихся материалов и уровня активности топлива. Данные характеристики определяются мощностью реактора, его типом, глубиной выгорания топлива и продолжительностью кампании, также коэффициентом воспроизводства вторичных делящихся материалов и временем выдержки топлива после его выгрузки из реактора.

Выгорание ядерного топлива – это деление ядер делящегося нуклида с высвобождением энергии и образованием осколочных нуклидов. Под глубиной выгорания топлива понимают отношение количества израсходованного ядерного топлива или количество выработанной энергии к общему количеству первоначально загруженного топливного материала, выраженное в процентах.

Глубина выгорания для водо-водяных реакторов составляет от 27 до 40 ГВт·сут/т U. Среднее значение принимают 33 ГВт·сут/т U.

Также для определения состава ОЯТ решающее значение имеет кампания топлива, то есть промежуток времени, за который первоначально загруженное топливо должно быть выгружено из реактора и заменено свежим. Для реакторов на тепловых нейтронах кампания топлива составляет 2-4 года, а для реакторов на быстрых нейтронах – менее года.

Кампания ядерного топлива обусловлена накоплением большого количества осколочных нуклидов, которое приводит к нарушениям режима работы реактора. Ведь среди продуктов деления накапливаются и нуклиды с большим сечением захвата нейтронов (^{135}Xe , ^{149}Sm), так называемые «нейтронные яды», их накопление может привести к прерыванию цепной

ядерной реакции вследствие резкого уменьшения плотности потока нейтронов. Также возможно накопление газообразных продуктов деления, наличие которых приводит к резкому повышению давления в твэлах, их последующей деформации и разрушению.

Немаловажной характеристикой для топлива является коэффициент воспроизводства. Он характеризует количество образующегося в процессе работы реактора вторичного делящегося материала и равен отношению числа образовавшихся делящихся ядер к числу выгоревших из первоначально загруженных делящихся ядер. Наибольшим коэффициентом воспроизводства обладают реакторы-размножители, цель работы которых направлена на наработку делящихся нуклидов. Для легководных водо-водяных реакторов коэффициент воспроизводства составляет от 0,5 до 0,6. Образующиеся вторичные делящиеся материалы также выгорают в ходе кампании топлива, внося весомый вклад в общую выработку энергии.

В настоящее время наиболее распространены водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) с мощностью от 440 МВт до 1200 МВт. Для них используется топливо на низкообогащенном ^{235}U (обогащение 3,5-4,5 %). В связи с этим дальнейшее рассмотрение состава и характеристик ОЯТ будет проходить на примере низкообогащенного уранового ядерного топлива.

После выгрузки из реактора облученное топливо выдерживают в специальных бассейнах на территории АЭС в течение определенного времени. Для керамического уранового топлива для ВВЭР оно составляет три года.

За время выдержки большое количество короткоживущих нуклидов продуктов деления распадаются, в связи с этим снижается активность топлива и его тепловыделение. Изотопный состав продуктов деления облученного топлива из ВВЭР-1000 представлен в таблице 1 [2].

Первые восемь нуклидов в таблице являются продуктами активации теплоносителя, а также его примесей и активированными продуктами коррозии. Остальные нуклиды относятся к продуктам деления ^{235}U , кроме ^{134}Cs , который является продуктом активации ^{133}Cs [2].

Таблица 1 – Средне- и долгоживущие радионуклиды, образующиеся при работе ВВЭР-1000

Нуклид	Нуклид	Нуклид	Нуклид
^3H	^{87}Rb	^{125}Sb	^{235}U
^{14}C	^{89}Sr	$^{127\text{m}}\text{Te}$	^{238}U
^{22}Na	^{90}Sr	$^{129\text{m}}\text{Te}$	^{237}Np
^{36}Cl	^{91}Y	^{129}I	^{238}Pu
^{41}Ca	^{93}Zr	^{134}Cs	^{239}Pu
^{54}Mn	^{95}Zr	^{135}Cs	^{240}Pu
^{55}Fe	^{94}Nb	^{137}Cs	^{241}Pu
^{60}Co	^{98}Tc	^{141}Ce	^{242}Pu
^{59}Ni	^{99}Tc	^{144}Ce	^{241}Am
^{63}Ni	^{103}Ru	^{147}Pr	$^{242\text{m}}\text{Am}$
^{79}Se	^{106}Ru	^{154}Eu	^{243}Am
^{85}Kr	^{126}Sn	^{155}Eu	^{241}Cm

Суммарная активность ОЯТ после полугода выдержки составляет примерно $1,5 \cdot 10^{17}$ Бк/т, после года выдержки – $8,5 \cdot 10^{16}$ Бк/т, а после 10 лет выдержки – $1,2 \cdot 10^{16}$ Бк/т [1]. При этом наибольший вклад в активность ОЯТ после выдержки вносят наиболее долгоживущие нуклиды: ^{90}Sr , ^{129}I , ^{137}Cs .

В таблице 2 представлены концентрации актиноидов в ОЯТ из легководного водо-водяного реактора с выгоранием 33 ГВт·сут/т У [1].

Таблица 2 – Концентрация актиноидов в отработавшем топливе

Нуклид	м, г/1 т топлива	Нуклид	м, г/1 т топлива	Нуклид	м, г/1 т топлива
^{235}U	8000	^{240}Pu	2140	^{243}Am	92
^{236}U	4520	^{241}Pu	1100	^{242}Cm	8
^{238}U	940000	^{242}Pu	340	^{244}Cm	31
^{238}Pu	168	^{237}Np	450	ΣАктиниды	9679
^{239}Pu	5300	^{241}Am	50	ΣУран	952520

Суммарное содержание всех актиноидов составляет 9,679 кг на 1 т топлива, содержание всех долгоживущих изотопов урана – 952,52 кг на 1 т топлива. Остальную массу ОЯТ составляют осколочные нуклиды – 37,801 кг.

Состав ОЯТ может изменяться в зависимости от времени его выдержки на базе АЭС и на самом радиохимическом заводе. Так, например, с течением

времени масса Nd и Pd увеличится, а масса Eu и Ru будет уменьшаться за счет радиоактивного распада продуктов деления [1].

1.2 Теория процесса волоксидации

Предварительную окислительную обработку ОЯТ проводят в нескольких целях. Во-первых, для удаления образовавшихся в процессе деления трития ^3H , ^{131}I и радиоактивных благородных газов – ^{85}Kr и ^{133}Xe . Йод и тритий являются биологически опасными компонентами ОЯТ. Они могут попасть в организм человека, заменяя нерадиоактивные изотопы тех же элементов в химических соединениях, присутствующих в теле. Удаление опасных летучих продуктов деления из топлива до его растворения позволяет существенно снизить их концентрацию в получаемых растворах, а также сконцентрировать их в небольших объемах для последующей утилизации. В процессе волоксидации можно выделить 99,5 % трития, от 40 до 70 % криптона, 25-40 % йода, а также отгоняется рутений в форме RuO_4 [1].

Основное количество йода удаляется фильтрацией через хроматографические колонны с насадкой, содержащей соли серебра или ртути, после стадии растворения ОЯТ. Также возможно использовать пропускание газового потока, содержащего йод, через абсорбционные колонны с раствором нитрата ртути в азотной кислоте, щелочью или кремнийорганическими соединениями [3]. Количество выделяемых в процессе переработки ОЯТ трития и криптона невелико и при эффективном рассеивании через высокие трубы не представляет опасности для населения [3].

Во-вторых, топливо из диоксида урана, взаимодействуя с окислителем, кардинально изменяет свою структуру, переходя в форму закиси-окиси урана. Компактный диоксид урана UO_2 в результате химической реакции превращается в мелкодисперсный порошок октаоксида триурана U_3O_8 :

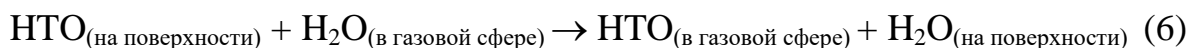


Кубическая кристаллическая решетка UO_2 изменяется в процессе окисления, сначала образуется U_3O_7 с гранецентрированной тетрагональной решеткой, а затем U_3O_8 с орторомбической решеткой [3]. Такая перемена в строении кристаллической решетки топлива позволяет высвободиться газообразным продуктам деления. А также частичное окисление урана до степени окисления +6 до проведения растворения ОЯТ существенно влияет на скорость его растворения и снижает расход кислоты-окислителя.

Рассмотрим несколько вариантов проведения процесса окисления. Конечным результатом процесса должно быть, во-первых, количественное удаление трития из ОЯТ, а, во-вторых, максимально полное изменение кристаллической структуры ядерного топлива. Тритий удаляется из облученного топлива путем связывания его в молекулы тритиевой воды T_2O и НТО. Так как концентрация трития в топливе крайне мала ($2 \cdot 10^{-5}$ ат. %), то весьма вероятно протекание реакций типа [2]:



При наличии в газовой фазе молекул H_2O вероятность связывания трития в тритиевую воду увеличивается, протекают реакции [2]:



Также при наличии молекул воды в газовой фазе увеличивается скорость и полнота удаления молекул НТО с поверхности частиц диоксида урана в газовую фазу в результате изотопного обмена. Из-за того, что концентрация молекул обычной воды во много раз выше, чем концентрация тритиевой воды равновесие в данном взаимодействии сдвигается в сторону продуктов реакции. В некоторых исследованиях содержание воды в окислительной газовой среде составляло 4-6 % [4].

Степень удаления трития из топлива прямо пропорционально зависит от полноты протекания процесса окисления. Для того чтобы ОЯТ окислилось полностью, необходимо обеспечить доступ окислительных реагентов ко всему

объему исходного материала. На полноту протекания волоксации будет влиять степень доступности топлива для реагента-окислителя, время нахождения ОЯТ в окислительной среде и концентрация реагента-окислителя. Степень доступности топлива для реагента-окислителя напрямую зависит от метода извлечения топлива из оболочек твэлов. Рассмотрим несколько вариантов по извлечению топлива из оболочек твэлов.

ОЯТ поступает на радиохимический завод в виде ОТВС (отработавших тепловыделяющих сборок). Первоначально концы сборок (хвостовики) обрезают с помощью специальных пил дистанционно, получают отдельные твэлы, которые далее можно перерабатывать несколькими методами. Основное разделение методов идет на механические и химические методы.

Химические методы предусматривают растворение оболочек твэлов вместе с отработавшим топливом или растворение только металлической оболочки. Их применяют в основном для твэлов, изготовленных из алюминиевых сплавов, для циркониевых сплавов и нержавеющей сталей метод с растворением оболочек не применяются. Существенным минусом химических методов является образование в процессе растворения большого количества жидких РАО, требующих захоронения.

Преимуществами механических методов удаления оболочек твэлов являются: удаление оболочек без их растворения и образования большого количества жидких РАО, а также возможность их дальнейшего захоронения или хранения в твёрдом виде; возможность селективного растворения сердечников твэлов и извлечение из них полезных компонентов. Механически оболочки твэлов могут быть удалены несколькими различными подходами. Например, в СССР был разработан метод, который заключался в резке сборок с помощью пресс-ножниц на куски размером 25-27 мм, куски твэлов с заключенным в них топливом далее подвергались выщелачиванию в азотной кислоте. Оболочки твэлов не растворялись и удалялись механически после стадии растворения. Этот процесс получил название «chop and leach». После резки твэлов на куски можно провести волоксацию непосредственно перед

выщелачиваем топлива, данный процесс исследуется по всему миру в настоящий момент.

Также известный метод по отделению оболочек твэлов – метод «очистки банана», заключающийся в разрезе оболочки твэла с помощью трёх фрез, расположенных по отношению друг к другу под углом 120° . Данный метод был разработан в Великобритании для отделения магноксовых оболочек от уранового топлива.

Известны и другие методы по отделению оболочек твэлов без растворения. Например, оплавление оболочек; электрохимическая резка, заключающаяся в селективном анодном растворении, когда растворяющий электролит подается специальной иглой на узкую полосу на поверхности твэла, образуя разрез; удаление оболочки с использованием фтор-иона; охрупчивание оболочки азотированием и гидрированием. Перечисленные методы не применяют на практике в настоящее время, так как они либо очень сложны по организации технологического процесса, либо приводят к образованию большого количества ВАО в результате утилизации используемых агрегатов.

На данный момент наиболее популярными являются методы, соединяющие в себе стадии отделения оболочек твэлов и волоксидации. Так, например, AIROX-процесс включает извлечение твэлов из ТВС, фрагментацию твэлов, перфорацию оболочек фрагментов твэлов через 2,5 см, циклическую термохимическую обработку фрагментов в среде кислорода при температуре 400°C и водорода в присутствии аргона при температуре 600°C [5]. В данном методе извлечение ОЯТ из оболочек происходит непосредственно в результате окислительного процесса. Полнота отделения порошка от оболочек и извлечения радиоактивных газообразных продуктов деления достигается при превращении диоксида урана в закись-окись урана в результате окисления, а затем в диоксид урана в результате восстановления водородом. Явными недостатками AIROX-процесса

являются: необходимость перфорации оболочек, сложность в организации процесса, необходимость проведения процесса неоднократно.

Также известен способ термической обработки фрагментированного ОЯТ в окислительной атмосфере в 2 стадии: в воздушной атмосфере, содержащей углекислый газ при температуре 400-650 °С в течении 60-360 минут, а затем при температуре 350-450 °С в воздушной обогащенной по кислороду атмосфере, содержащей водяной пар в количестве точки росы при температуре 30-40 °С, в течении 30-120 минут. Обе стадии проводят при непрерывной или периодической механоактивации. Наибольшим недостатком данного процесса является необходимость получения мелких фрагментов ТВЭЛОВ и снижение эффективности волоксидации при увеличении степени замятия торцов.

Каждый из описанных методов имеет как преимущества, так и недостатки. Основным недостатком механических методов является необходимость перфорации ТВЭЛОВ на достаточно мелкие куски. Это снижает возможную производительность, а также эффективность извлечения ОЯТ при замятии кусков ТВЭЛОВ, так как цирконий и сплавы на его основе являются пластичными.

В литературе отмечают несколько возможных для использования окислителей. Например, в методе термической обработки фрагментированного ОЯТ с использованием механоактивации предлагают использовать окислительную смесь: диоксид азота в количестве 15-56 мас. % и кислород в количестве 41-83 мас. %, насыщенные парами воды в количестве 1,2-9,5 мас. % [5]. Процесс окисления проходит на зернистом слое каталитически активной насадки, в качестве которой может быть использован оксид алюминия, цирконий, титан или металлы платиновой группы, а также их смесь. При одновременном воздействии нитрующего и окислительного компонента на реакционную поверхность ОЯТ происходит извлечение топлива из оболочек в результате разнонаправленной трансформации его

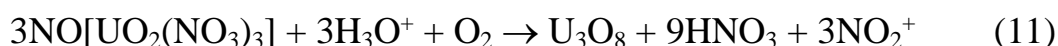
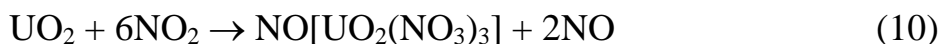
объема. Увеличение нитрующей активности системы реагентов достигается получением паров азотной кислоты, образующейся в парогазовой фазе при смешении потоков газов в зоне зернистого слоя насадки при температуре 60-100 °С:



При температуре 290-360 °С происходит интенсификация ионизации азотной кислоты, при этом удастся получить наиболее реакционно-активные ионные формы:



После каталитической активации парогазовая смесь поступает в реактор с предварительно нагретыми фрагментами твэлов (325-375 °С). В результате реакции между диоксидом азота и диоксидом урана образуется промежуточное соединение – тринитротоуранилат нитрозония, который далее подвергается окислению кислородом с образованием закиси-окиси урана [5]:



Образующаяся в парогазовой фазе нитрующая смесь является очень коррозионно активной. Для осуществления данного процесса необходимо использовать кислотостойкие материалы для создания аппаратов.

В качестве окислителя можно использовать кислород. Процесс окисления проводят в среде азота при температуре 450-600 °С. Соотношение $\text{N}_2:\text{O}_2 = 1:1$. Процесс проводят с зацикливанием газовой фазы с дозировкой кислорода по падению давления в системе, которое поддерживается на уровне 1 атм [6].

Окисление диоксида урана проходит по реакции (3). Реакция приводит к превращению компактного диоксида урана в мелкодисперсный порошок закиси-окиси и сопровождается изменением кубической кристаллической решетки UO_2 сначала в гранецентрированную тетрагональную решетку U_3O_7 ,

а затем в орторомбическую U_3O_8 . Двойная перекристаллизация топлива существенно увеличивает подвижность продуктов деления, в том числе газообразных. Размер получаемых частиц после перекристаллизации достигает нескольких микрометров.

1.3 Аппаратурное оформление волоксации

Процессу окисления предшествует подготовка ОЯТ, направленная на как можно более эффективное отделение топливных таблеток от металлических оболочек. Наиболее подходящим данному технологическому процессу является метод «очистки банана», спроектированный и применяемый на заводе в Селлафилде, Великобритания. Продольный надрез оболочки производится тремя фрезами, расположенными по отношению друг к другу под углом 120° [7]. В процессе отделения оболочки от топлива от 50 до 100 % топливных таблеток рассыпаются. Так как в процессе резки могут быть повреждены топливные элементы, то осуществление данной операции должно осуществляться, во-первых, дистанционно, а, во-вторых, в таких условиях, в которых мелкие частички таблеток не будут попадать в окружающую среду и оседать на поверхностях. Возможно, данный процесс целесообразно проводить в водной среде, либо в герметичном боксе под разряжением. Собранные пылевидные частицы ОЯТ должны быть направлены на стадию волоксации, либо на растворение ОЯТ.

На рисунке 1 можно увидеть схематическое описание данного метода.

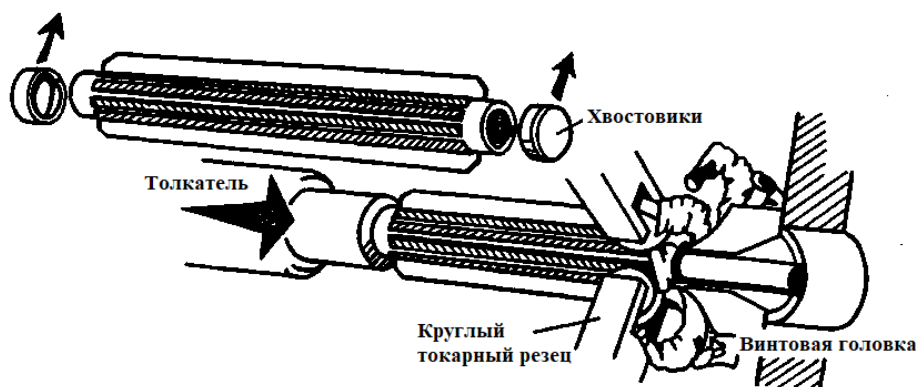


Рисунок 1 – Метод «очистки банана»

Процесс окисления облученного топлива представляет собой гетерогенный процесс взаимодействия твёрдого диоксида урана и газообразного кислорода. При перемешивании или механоактивации процесс интенсифицируется и проходит более полно. Необходимо подобрать аппарат, который бы удовлетворял данным требованиям: подача газообразного реагента в герметичный аппарат с возможностью непрерывного его взаимодействия с твёрдыми частицами ОЯТ.

Одним из возможных вариантов проведения процесса волоксации является термохимическое вскрытие металлической оболочки и окисления топливной композиции в аппарате «Хруст». Принцип работы данной установки основан на резкой потере прочности циркония под действием высокой температуры (около 1000 °С) в азото-кислородной атмосфере. Техничко-экономические исследования по сопоставлению различных технологий переработки ОЯТ показали, что использование установки «Хруст» дает значительный экономический эффект по сравнению с традиционной рубкой за счет уменьшения габаритов.

После термохимического разрушения оболочки при температуре около 500 °С кристаллическая решетка UO_2 разрушается с образованием U_3O_8 , топливо рассыпается, и тритий легко отгоняется с последующим улавливанием на операции газоочистки и включением в специальную матрицу. Внешний вид такого аппарата представлен на рисунке 2.

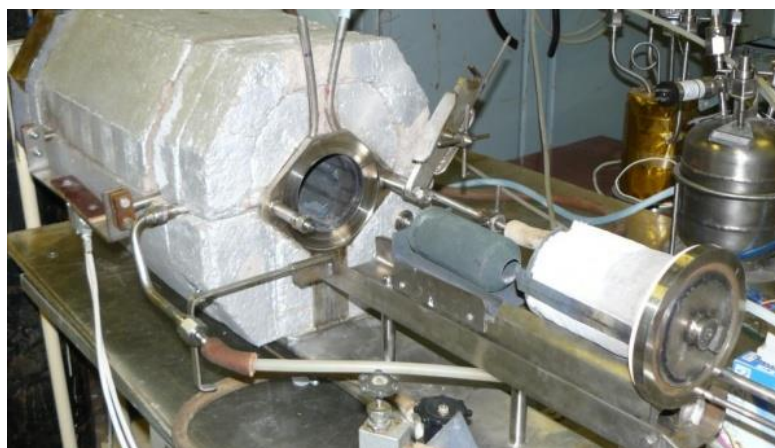


Рисунок 2 – Установка «мини Хруст». Вид нагревателя, ампулы для ОЯТ и пробки [8]

Аппарат представляет собой трубу, футерованную теплоизоляционным материалом, к ней подается тепло с помощью электрического нагрева. В трубу помещают либо ТВС как в полномасштабной установке, либо фрагментированные твэлы с ОЯТ. Для выгрузки окисленных продуктов из печи ТВС и твэлы могут помещаться в печь в специальных ампулах или использовать аппарат под наклоном. Аппарат может быть выполнен по типу барабанной вращающейся печи.

Основные достоинства вращающихся печей – простота, надежность, высокая производительность и возможность осуществления непрерывного полностью автоматизированного процесса.

Основные части вращающейся трубчатой печи – металлическая труба (реторта), поддерживаемая роликами опорных станций, и головки печи, называемые также камерами (загрузочная, куда поступает материал из питающего бункера, и разгрузочная, находящаяся в более низко расположенной части печи). Камеры служат также для подачи и отвода газов. Для обеспечения горизонтального перемешивания материала ось трубы немного наклонена к горизонтالي. Внутренняя поверхность реторты может быть гладкой или иметь специальные насадки, гребки и цепи, которые изменяют характер движения материала и тем самым улучшают условия фазового контакта, а иногда и теплопередачи.

Один из важных узлов вращающейся печи – уплотнение между её камерами и подвижной ретортой. Уплотнения выполняют в виде сальников с асбестовыми прокладками. Известны лабиринтные, радиальные и торцовые уплотнения. Иногда в зазор между подвижной и неподвижной частью уплотнения подают под небольшим избыточным давлением инертный газ [9].

На рисунке 3 [10] изображена схема вращающейся барабанной печи для обжига сыпучих материалов. На схеме цифрами обозначены:

1 – механизм загрузки, 2 – барабан, 3 – опорные бандажи, 4 – венцовая шестерня, 5 – механизм разгрузки, 6 – опорно-упорная станция.

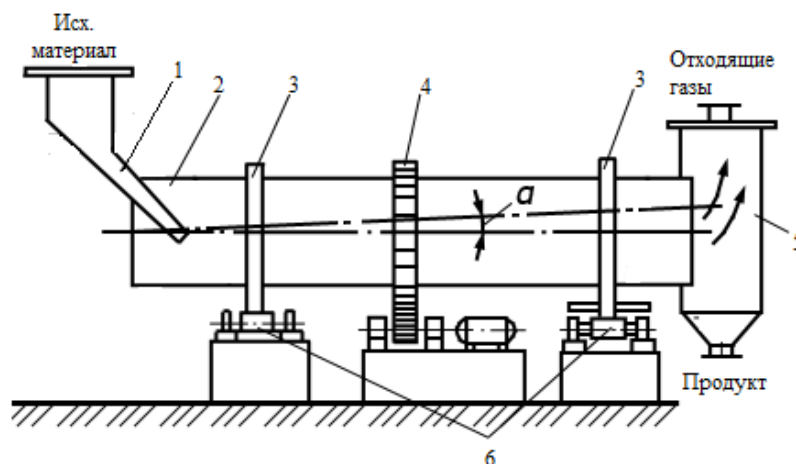


Рисунок 3 – Схема вращающейся трубчатой печи

Волоксидацию ОЯТ возможно провести во вращающейся трубчатой печи. В ней будет обеспечено перемешивание топливных таблеток для лучшего их контакта с газовой фазой. Но в процессе окисления топливные таблетки будут рассыпаться из-за изменения кристаллической решетки оксида урана. Основная часть частиц закиси-оксида урана должна уноситься потоком кислорода в аппарат типа циклон, часть же частиц будет попадать из печи в цех. Крайне сложно организовать достаточно полную герметизацию процесса, лабиринтные, радиальные и торцовые уплотнения не могут ограничить пылеунос в достаточной для безопасного проведения процесса степени.

В качестве аппарата для проведения процесса волоксидации может быть использован аппарат кипящего (псевдооживленного) слоя. Данные реакторы интересны тем, что, прежде всего с их использованием возможна значительная интенсификация реакций, протекающих на поверхности твёрдых частиц, а также возможно строго контролировать температуру проводимого процесса. В кипящем слое даже мелкие частицы в общем случае отделены одна от другой газовой прослойкой; поэтому величина активной поверхности материала в этих аппаратах намного больше этой поверхности во

вращающихся трубчатых или шнековых печах. Достоинство реакторов кипящего слоя – возможность совмещения химического процесса с транспортированием материала. Псевдоожиженный порошок – текучий; это упрощает устройства для его выгрузки. Кроме того, при увеличении скорости газа до определенной величины содержимое реактора может быть выгружено с помощью пневмотранспорта. В слое псевдоожиженного материала процессы теплообмена проходят очень интенсивно. Особенно это характерно для обмена между твердыми частицами и газом, а также между кипящим слоем и стенкой аппарата или погруженными в слой теплообменными поверхностями. Аппаратурное оформление процессов псевдоожижения относительно несложно; реактор и связанные с ним системы легко поддаются механизации и автоматизации. При необходимости возможно дистанционное управление процессом. К существенным недостаткам этих реакторов относится большой пылеунос, истирание частиц и эрозия стенок аппарата, а также ограничения, обусловленные гидродинамикой системы твердое – газ.

На рисунке 4 представлен общий вид аппарата кипящего слоя [9]. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – патрубок ввода материала на прокаливании; 2 – патрубок для отбора проб порошка; 3 – труба вывода продукта; 4 – пористый распределитель; 5 – нагреватель газа; 6 – патрубок ввода газа; 7 – нагреватели кипящего слоя; 8 – циклон; 9 – патрубок вывода газа.

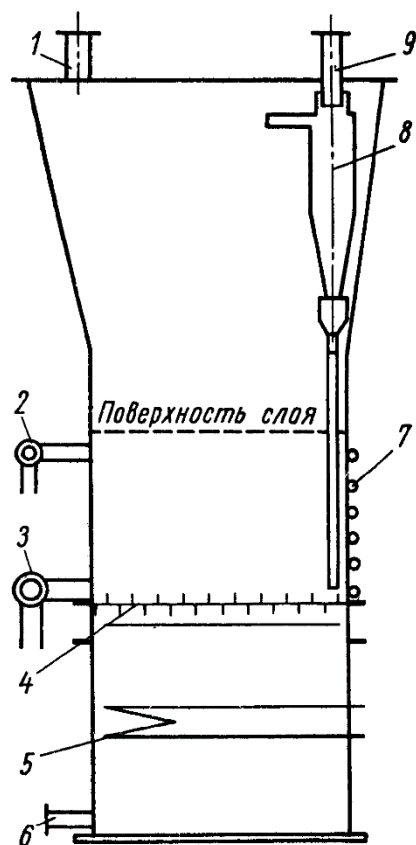
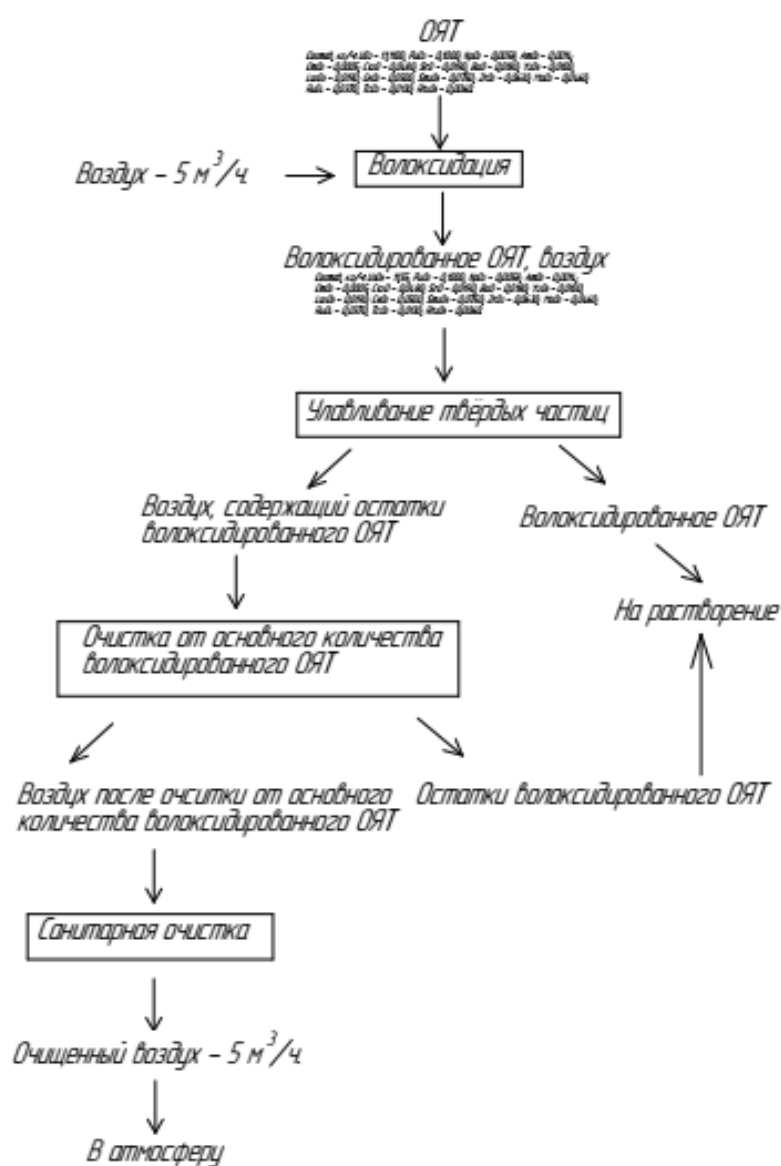


Рисунок 4 – Реактор кипящего слоя для прокаливания

Загрузка материала в аппарат кипящего слоя может осуществляться с помощью шнекового транспортера из бункера для хранения твердых частиц материала.

2 Расчеты и аналитика

Процесс волоксации сопровождается несколькими вспомогательными операциями, направленными на очистку газообразной фазы после окисления облученного топлива. В данном разделе будут рассмотрены технологическая схема процесса, расчет основного аппарата в зависимости от материальных потоков и теплового баланса протекающей реакции. Общий вид технологической схемы волоксации представлен на рисунке 5.



6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Технологический участок волоксации входит в цех по переработке ОЯТ. Основная цель данного раздела – рассчитать себестоимость промежуточного продукта (волоксидированного ОЯТ). Для этого необходимо оценить стоимость строительства и эксплуатации участка, рассчитать количество необходимого персонала и затраты на их заработную плату, а также стоимость реагентов для проведения процесса.

6.1 Расчет производственной мощности

Расчет производственной мощности M можно произвести по формуле:

$$M = P_{\text{час}} \cdot T_{\text{эфф}} \cdot n, \quad (98)$$

где $T_{\text{эфф}}$ – эффективное время работы оборудования;

n – количество однотипного оборудования;

$P_{\text{час}}$ – часовая производительность ведущего оборудования.

Для расчета производственной мощности участка волоксации в цехе по переработке ОЯТ ведущим оборудованием является непрерывно работающий аппарат волоксации.

Часовая производительность аппарата волоксации по ОЯТ составит $P_{\text{час}} = 11,63$ кг/ч.

Расчет эффективного времени работы оборудования описывается следующей формулой:

$$T_{\text{эфф}} = T_{\text{н}} - T_{\text{рем}} - T_{\text{пр}}, \quad (99)$$

где $T_{\text{н}}$ – номинальный фонд работы оборудования;

$T_{\text{рем}}$ – время простоя оборудования в ремонтах за расчетный период;

$T_{\text{пр}}$ – время технологически неизбежных остановок.

За номинальный фонд работы оборудования принимаем 1 календарный год (365 дней, 8760 часов).

На предприятиях химической промышленности система планово-предупредительных ремонтов (ППР) предусматривает проведение следующих категорий ремонта: текущего, среднего и капитального [35]:

Расчет осуществляется для ведущего аппарата. Время эффективной работы вспомогательного оборудования принимается по ведущему аппарату.

Количество текущих ремонтов за ремонтный цикл определяется по формуле:

$$R = \frac{P_{\Pi}}{T_T}, \quad (100)$$

где R – количество всех ремонтов за ремонтный цикл;

P_{Π} – длительность ремонтного цикла, ч;

T_T – пробег оборудования между текущими ремонтами, ч.

Время между ремонтными циклами [35]:

- между текущими – 1440 часов, время простоя – 16 часов;
- между средними – 8760 часов, время простоя – 400 часов;
- между капитальными – 25280 часов, время простоя – 2160 часов.

$$R = \frac{25280}{1440} = 18.$$

Длительность ремонтного цикла составляет 25280 часов – 3 года.

Количество средних ремонтов за ремонтный цикл (R_C) определяется по формуле:

$$R_C = \frac{T_M}{T_C} - 1, \quad (101)$$

где T_C – пробег оборудования между средними ремонтами, ч.

$$R_C = \frac{25280}{8760} - 1 = 2.$$

Количество текущих ремонтов (R_T) определяется по формуле:

$$R_T = \frac{T_M}{T_T} - R_C - 1, \quad (102)$$

где T_T – пробег оборудования между текущими ремонтами, ч.

$$R_T = \frac{25280}{1440} - 2 - 1 = 15.$$

Всего проводят 6 ремонтов в течение расчетного цикла (трёх лет).

Таким образом, в расчетный период на участке производится 1 средний и 5 текущих ремонтов.

Тогда время на ремонт оборудования в расчетный период определяется по формуле:

$$T_{\text{рем}} = 5 \cdot T_{\text{пр.т.}} + 1 \cdot T_{\text{пр.с.}}, \quad (103)$$

где $T_{\text{пр.т.}}$ – время простоя оборудования между текущим ремонтом, ч;

$T_{\text{пр.с.}}$ – время простоя оборудования между средним ремонтом, ч.

$$T_{\text{рем}} = 5 \cdot 16 + 1 \cdot 400 = 480 \text{ ч.}$$

Время простоя оборудования между ремонтами:

$$T_{\text{пр}} = T_{\text{ост}} + T_{\text{пуск}}, \quad (104)$$

где $T_{\text{ост}}$ – время остановки, ч (4 часа);

$T_{\text{пуск}}$ – время пуска, ч (4 часа).

$$T_{\text{пр}} = 4 + 4 = 8.$$

$$T_{\text{эфф}} = 8760 - 480 - 8 = 8272 \text{ ч} = 344 \text{ дня.}$$

Рассчитаем производственную мощность:

$$M = 11,63 \cdot 8272 \cdot 1 = 96203,4 \text{ кг.}$$

6.2 Расчет затрат на объект

Расчет капитальных затрат на объект ведется по формуле:

$$C_{\text{зд}} = C + C_{\text{от}} + C_{\text{вен}} + C_{\text{вод}} + C_{\text{отв}} + C_{\text{осв}}, \quad (105)$$

где C – стоимость строительства объекта, рублей;

$C_{\text{от}}$ – стоимость затрат на создание системы отопления, рублей;

$C_{\text{вен}}$ – стоимость затрат на создание системы вентиляции, рублей;

$C_{\text{вод}}$ – стоимость затрат на создание системы водоснабжения, рублей;

$C_{\text{отв}}$ – стоимость затрат на создание системы водоотведения, рублей;

$C_{\text{осв}}$ – стоимость затрат на создание системы освещения, рублей.

Стоимость создания объекта определяется по формуле:

$$C = C_1 \cdot V, \quad (106)$$

где C_1 – стоимость 1 м³ объекта, рублей,

V – объем здания, м³.

Величина капитальных затрат на строительство участка и его сооружения определяется по укрупненным параметрам с применением экспертной оценки на основании рекомендуемой методики. Укрупненным параметром является стоимость 1 м³ здания, согласно действующим ценам на строительные материалы с учетом характера здания, его размеров и назначения. Рассчитаем только стоимость строительства помещения с участком волоксации ОЯТ.

Зададим размеры здания: длина – 30 м, ширина – 15 м и высота – 10 м. При стоимости 1 м³ помещения – 30000 рублей, стоимость участка волоксации цеха по переработке ОЯТ составит 135000000 рублей.

Амортизационные отчисления на объект составят 10 % от стоимости участка волоксации – 13500000 рублей/год.

В таблице 14 представлены затраты на остальные работы – санитарно-технические.

Таблица 14 – Стоимость санитарно-технических работ

Вид затрат	Процент от затрат на постройку здания, %	Цена, рублей
На систему отопления	5	6750000
На систему вентиляции	5	6750000
На систему водоснабжения	3	4050000
На систему водоотведения	3	4050000
На систему освещения	2	2700000
ИТОГО	18	24300000

$$C_{зд} = 135000000 + 24300000 = 159300000 \text{ рублей.}$$

Капитальные затраты на строительство участка волоксации составят 159300000 рублей.

6.3 Расчет затрат на оборудование

Затраты на приобретение оборудования рассчитываются по формуле:

$$C_{об} = C_{пр.об} + C_{м.об}, \quad (107)$$

где $C_{пр.об}$ – затраты на приобретение оборудования, рубли;

$C_{м.об}$ – затраты на монтаж оборудования, рубли.

Затраты на приобретение оборудования приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Затраты на приобретение оборудования

Наименование	Количество, шт	Цена за 1 ед. без НДС, рубли	НДС 20 %, рубли	Сумма с учетом НДС, рубли
Бункер загрузки ОЯТ	1	50000	10000	60000
Шнековый транспортер	1	70000	14000	84000
Аппарат волоксидации ОЯТ	1	3200000	640000	3840000
Теплообменный аппарат для нагрева воздуха	1	500000	100000	600000
Насос для подачи воздуха	1	40000	8000	48000
Циклон для выгрузки основного количества волоксирированного ОЯТ	1	200000	40000	240000
Бункер сбора волоксирированного ОЯТ	4	200000	40000	240000
Циклон пылеочистки воздуха	1	200000	40000	240000
Фильтр тонкой очистки для пылеочистки	1	700000	140000	840000
Фильтр тонкой очистки для санитарной очистки воздуха	1	600000	120000	720000
Насадочный скруббер санитарной очистки воздуха	1	1000000	200000	1200000
Резервуар для подачи воды	2	100000	20000	120000
Насос для подачи воды	3	105000	21000	126000
ИТОГО	19	6965000	1393000	8358000

Расходы на монтаж и оборудование представлены в таблице 16.

Таблица 16 - Расходы на монтаж оборудования и ПНР по экспертной оценке

Наименование нормативов	Процент от стоимости оборудования, %	Стоимость, рубли
Технологические трубопроводы	10	835800
Кабельные разводки	3	250740
КИПиА	10	835800
Монтаж оборудования	15	1253700
Транспортные расходы	8	668640
ИТОГО	46	3844680

Затраты на оборудование составят:

$$C_{об}=8358000+3844680=12202680 \text{ рублей.}$$

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A_{об}=C_{пр.об} \cdot \alpha, \quad (108)$$

где $C_{пр.об}$ – затраты на приобретение оборудования, руб.,

α – норма амортизации, примем 10 %.

Амортизация оборудования – 10 % от стоимости оборудования:

$$A_{об}=8358000 \cdot 0,1=835800 \text{ рублей/год.}$$

Полные капитальные затраты на строительство и оборудование для участка волоксации ОЯТ представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Полные капитальные затраты

Наименование	Капитальные затраты	
	Стоимость, рубли	Вклад, %
Объект	159300000	92,9 %
Оборудование	12202680	7,1 %
ИТОГО	171502680	100 %

6.4 Расчет затрат на заработную плату персонала

Участок волоксации должен работать непрерывно, остановки рабочего процесса предусмотрены только для планово-предупредительного ремонта или аварии.

На участке рабочие объединены в 5 бригад, которые работают 3 смены по 8 часов каждая. Также предусмотрена шестая бригада, которая заменяет в графике одну из бригад, находящуюся в очередном отпуске. График смен, где бригады обозначены буквами от А до Е соответственно, приведен в таблице 18.

Таблица 18 – График смен для бригад А, Б, В, Г, Д, Е

Время смены	Бригада														
с 00:00 до 08:00	А	А	А	Б	Б	Б	В	В	В	Г	Г	Г	Д	Д	Д
с 08:00 до 16:00	Г	Г	Д	Д	Д	А	А	А	Б	Б	Б	В	В	В	Г
с 16:00 до 00:00	Б	В	В	В	Г	Г	Г	Д	Д	Д	А	А	А	Б	Б
Выходные дни	В, Д	Б, Д	Б, Г	А, Г	А, В	В, Д	Б, Д	Б, Г	А, Г	А, В	В, Д	Б, Д	Б, Г	А, Г	А, В
Отпуск	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е

Длительность сменоборота рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{см.об.}} = n \cdot N, \quad (109)$$

где $T_{\text{см.об.}}$ – длительность сменоборота, дни;

n – число бригад, для которых считается сменобороот, шт;

N – число дней, когда бригада ходит в смену, шт.

$$T_{\text{см.об.}} = 5 \cdot 3 = 15 \text{ дней.}$$

За один сменоборот, длительность которого составляет 15 дней, каждая из пяти бригад имеет 9 восьмичасовых рабочих дней и 6 выходных.

Календарный фонд времени принимается равным 365 дней (8760 часов) [36].

Для определения эффективного времени одного рабочего необходимо определить количество выходных дней, а также количество прочих планируемых невыходов. Для расчета количества выходных дней необходимо

от календарных дней отнять число дней, выделенных на очередные и дополнительные отпуска. Количество выходных дней равно:

$$V_{\text{ых}} = \frac{(365-36) \cdot 6}{15} = 131 \text{ день} = 1048 \text{ ч.}$$

В таблице 19 представлен баланс эффективного времени одного среднесписочного рабочего.

Таблица 19 – Баланс эффективного времени одного среднесписочного рабочего

Показатели времени	Дни	Часы
Календарное число дней	365	2920
Очередные и дополнительные отпуска	36	288
Выходные дни	131	1048
Номинальный фонд рабочего времени	198	1752
Дополнительные планируемые пропуски рабочего времени:		
– по болезни;	10	80
– из-за выполнения общественных обязанностей;	1	8
– из-за повышения квалификации, учебы, командировки.	4	32
ИТОГО	15	120
Эффективный фонд рабочего времени	183	1464

Эффективное время работы одного среднесписочного рабочего определяется по формуле:

$$T_{\text{эфф.раб}} = T_{\text{н}} - \sum T_{\text{отп}}, \quad (110)$$

$$T_{\text{эфф.раб}} = 365 - 36 - 131 = 183 \text{ дня} = 1464 \text{ ч.}$$

Эффективное время работы одного среднесписочного рабочего в сутки составит:

$$T_{\text{эфф}} = T_{\text{эфф.раб}} \cdot n, \quad (111)$$

где n – количество смен.

$$T_{\text{эфф}} = 1464 \cdot 3 = 4392 \text{ ч.}$$

Рассчитаем численность необходимых для функционирования производства рабочих. Определим явочное число основных рабочих в сутки $R_{\text{яв}}$, выполняющих технологические операции по формуле:

$$R_{\text{яв}} = \frac{n \cdot c}{H_{\text{обсл}}}, \quad (112)$$

где $N_{обсл}$ – количество аппаратов, которое может обслуживать один рабочий в течение смены;

n – количество установок;

c – количество смен в сутки.

К основному оборудованию на участке волоксации можно отнести: аппарат волоксации, циклон для выгрузки основного количества вещества, циклон для пылеочистки, фильтр тонкой очистки (ФТО) для пылеочистки, ФТО для санитарной очистки и насадочный скруббер для санитарной очистки – 6 единиц технологического оборудования.

$$R_{яв} = \frac{6 \cdot 3}{2} = 9 \text{ человек.}$$

Определим списочное количество основных рабочих в сутки $R_{сп}$ по формуле:

$$R_{сп} = R_{яв} \cdot \frac{T_{эфф.обор.}}{T_{эфф.раб}}, \quad (113)$$

где $T_{эфф.обор.}$ – проектируемое число дней работы оборудования;

$T_{эфф.раб}$ – проектируемое число дней работы в год среднесписочного рабочего.

$$R_{сп} = 9 \cdot \frac{365}{183} = 18 \text{ человек.}$$

Количество персонала для обслуживания аппаратов в одну смену равняется трём: оператор участка окисления (реактор кипящего слоя, подача воздуха и топлива в аппарат); оператор на линии пылеочистки (циклоны и ФТО пылеочистки); оператор на линии санитарной очистки воздуха.

С учетом специфики работы участка, комплектуем смену следующим вспомогательным персоналом: слесарь-ремонтник (1 человек), слесарь КИПиА (1 человек), электрик (1 человек), дозиметрист.

В инженерно-технический состав участка входят: мастер участка смены (1 человек), сменный инженер-технолог (1 человек), начальник участка (1 человек) – не является сменным персоналом.

В таблице 20 представлена численность сменного персонала участка волоксации.

Таблица 20 – Численность сменного персонала участка

Должность	Количество персонала		
	Р _{яв} / смена	Р _{яв} / сутки	Р _{сп} / сутки
Оператор участка окисления	1	3	6
Оператор на линии пылеочистки	1	3	6
Оператор на линии санитарной очистки воздуха	1	3	6
Слесарь-ремонтник	1	3	6
Слесарь КИПиА	1	3	6
Электрик	1	3	6
Дозиметрист	1	3	6
Мастер участка смены	1	3	6
Сменный инженер-технолог	1	3	6
Итого	9	27	54

Фон заработной платы формируется из основной и дополнительной заработной платы [37]:

$$З = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}, \quad (114)$$

где $З_{\text{осн}}$ – основной фонд заработной платы;

$З_{\text{доп}}$ – дополнительный фонд заработной платы.

Основной фонд заработной платы складывается из основной заработной платы: оклада или ставки, и дополнительной заработной платы: доплаты и премии, по формуле:

$$З_{\text{осн}} = (З_{\text{тар}} + Д_{\text{вр}} + Д_{\text{ночи}}) \cdot (1 + К_{\text{ск}} + К_{\text{рк}}), \quad (115)$$

где $З_{\text{тар}}$ – тарифный фонд заработной платы;

$Д_{\text{вр}}$ – доплата за вредность;

$Д_{\text{ночи}}$ – доплата за ночные часы (10 %);

$К_{\text{ск}}$ – краевой коэффициент (30 %);

$К_{\text{рк}}$ – районный коэффициент (30 %).

Доплата за вредность составляет 24 % от оклада. Доплата за ночные часы определяется количеством ночных часов, проведенных на смене за

календарный год. В каждом сменобороте – 24 ночных часа из 72. Доплата за ночные часы составит 10 % от оклада.

В таблице 21 представлены данные по основному фонду заработной платы персонала.

Таблица 21 – Основной фонд заработной платы

Должность	Численность	Оклад, рубли	Д _{вр}	Д _{ночи}	К _{ср}	К _{рк}	Зарплата, рубли
Начальник участка	1	56799	13632	–	17040	17040	104511
Оператор участка окисления	6	25799	6192	2580	7740	7740	300306
Оператор на линии пылеочистки	6	25799	6192	2580	7740	7740	300306
Оператор на линии санитарной очистки воздуха	6	25799	6192	2580	7740	7740	300306
Слесарь-ремонтник	6	17533	4208	1753	5260	5260	204084
Слесарь КИПиА	6	17533	4208	1753	5260	5260	204084
Электрик	6	17533	4208	1753	5260	5260	204084
Дозиметрист	6	21678	5203	2168	6503	6503	252330
Мастер участка смены	6	38469	9233	3847	11541	11541	447786
Сменный инженер-технолог	6	29476	7074	2948	8843	8843	343104
Итого	55	2660901					

В календарном году 14 праздничных дней, оплачиваемых в двойном размере, согласно статье 112 ТК РФ.

Расчет доплаты за работу в праздничные дни:

$$D_{\text{празд}} = \frac{\sum Z_{\text{тар}} \cdot N \cdot k}{n}, \quad (116)$$

где $\sum Z_{\text{тар}}$ – сумма месячных окладов, рубли;

N – количество месяцев в году;

n – количество календарных дней в году;

k – количество праздничных дней в году.

Принимаем число рабочих месяцев в году равным 10,8, следовательно, суммарная основная заработная плата за год для всех сотрудников составит:

$$\sum Z_{\text{тар}} = 10,8 \cdot 2660901 = 28737731 \text{ рублей/год.}$$

Дополнительный фонд заработной платы (резерв на отпуск и резерв на дополнительные планируемые невыходы) рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{доп}} = З_{\text{осн}} \cdot П_{\text{доп}}, \quad (117)$$

где $П_{\text{доп}}$ – процент доплаты, который рассчитывается по формуле:

$$П_{\text{доп}} = \frac{Д_{\text{н}}}{В_{\text{п}}} \cdot 100 \%, \quad (118)$$

где $Д_{\text{н}}$ – планируемые целодневные невыходы в год;

$В_{\text{п}}$ – планируемое количество дней работы одного рабочего.

$$П_{\text{доп}} = \left(\frac{36}{198} + \frac{15}{183} \right) \cdot 100 \% = 26,4 \, \%.$$

$$З_{\text{доп}} = 28737731 \cdot 0,264 = 7586761 \text{ рублей}.$$

Годовой фонд заработной платы составит:

$$Ф_{\text{зп/год}} = 28737731 + 7586761 = 36324492 \text{ рубля/год}.$$

Затраты на социальные нужды составляют 30 % (налог во внебюджетные фонды):

$$З_{\text{соц}} = 36324492 \cdot 0,3 = 10897348 \text{ рублей/год}.$$

Затраты на организацию труда и техники безопасности, принимаются равными 10 % от полного годового фонда заработной платы:

$$З_{\text{орг}} = 36324492 \cdot 0,1 = 3632449 \text{ рублей/год}.$$

Общие затраты на содержание персонала:

$$З_{\text{сп}} = 36324492 + 10897348 + 3632449 = 50854289 \text{ рублей/год}.$$

6.5 Расчет эксплуатационных затрат

К эксплуатационным затратам относят затраты на отопление, вентиляцию, водоснабжение, водоотведение, освещение, электроэнергию, содержание оборудования, проведение текущего ремонта.

Расчет затрат на освещение:

$$C_{\text{осв}} = \frac{15 \cdot S \cdot n \cdot C}{1000}, \quad (119)$$

где 15 – количество Вт на 1 м² пола;

S – площадь помещения, 450 м²;

t – количество часов искусственного освещения в сутки, 24 ч;

n – количество дней в году, 365 дней;

C – тариф на электроэнергию, 4,24 руб/кВт·ч.

$$C_{\text{осв}} = \frac{15 \cdot 450 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 4,24}{1000} = 250711,20 \text{ рублей.}$$

Расчет затрат на вентиляцию помещения:

$$C_{\text{вен}} = \frac{f \cdot T \cdot V \cdot K \cdot C}{1000}, \quad (120)$$

где f – норма расхода электроэнергии, 0,5;

T – календарный фонд времени, 8760 ч;

V – внутренний объем помещения, 4500 м³;

K – кратность воздухообмена, 10;

C – тариф на электроэнергию, 4,24 руб/кВт·ч.

$$C_{\text{вен}} = \frac{0,5 \cdot 8760 \cdot 4500 \cdot 10 \cdot 4,24}{1000} = 835704 \text{ рубля.}$$

Расчет затрат на отопление помещения:

$$C_{\text{от}} = \frac{f \cdot T \cdot V \cdot C}{1000}, \quad (121)$$

где f – норматив на отопление, 0,005 Гкал/м³;

T – продолжительность отопительного сезона, 4752 ч;

V – объем отапливаемого помещения, 4500 м³;

C – тариф на отопление, 2464,39 руб/Гкал.

$$C_{\text{от}} = \frac{0,005 \cdot 4752 \cdot 4500 \cdot 2464,39}{1000} = 263492,60 \text{ рубля.}$$

Затраты на электроэнергию, потребляемую оборудованием являются переменными, так как они зависят от объема выпускаемой продукции. Расчет затрат электроэнергии, потребляемой оборудованием:

$$C_{\text{об}} = W \cdot T_{\text{эфф}} \cdot C, \quad (122)$$

где W – мощность, потребляемая электрооборудованием, 310,206 кВт;

$T_{\text{эфф}}$ – эффективное время работы оборудования, 8272 ч;

C – тариф на электроэнергию, 4,24 руб/кВт·ч.

$$C_{\text{об}} = 310,206 \cdot 8272 \cdot 4,24 = 10879941,9 \text{ рубль.}$$

Расчет затрат на текущий ремонт оборудования при условии, что они составляют 12 % от стоимости оборудования:

$$З_{\text{рем.об.}} = 8358000 \cdot 0,12 = 1002960 \text{ рублей.}$$

Расчет расходов на содержание оборудования при условии, что они составляют 5 % от стоимости оборудования:

$$З_{\text{сод}} = 8358000 \cdot 0,05 = 417900 \text{ рублей.}$$

Расчет затрат на потребление воды:

$$C_{\text{вод}} = n \cdot Q \cdot k \cdot T \cdot C, \quad (123)$$

где n – количество персонала за одну смену, 10 человек;

Q – расход воды на одного человека за смену, $\text{м}^3/\text{ч}$;

k – количество смен в сутки, 3;

T – количество дней работы персонала, 365 дней;

C – стоимость воды, $\text{руб}/\text{м}^3$.

Рекомендуемый средний расход водоснабжения на одного человека: $0,1 \text{ м}^3/\text{чел}$ – ХВС, $0,05 \text{ м}^3/\text{чел}$ – ГВС, $0,002 \text{ м}^3/\text{чел}$ – питьевая вода.

Тарифная оплата воды: техническая холодная вода – $9,9 \text{ руб}/\text{м}^3$, горячая вода – $61,1 \text{ руб}/\text{м}^3$, питьевая вода – $29,7 \text{ руб}/\text{м}^3$.

Затраты на горячую воду:

$$C_{\text{ХВС}} = 10 \cdot 0,1 \cdot 3 \cdot 365 \cdot 9,9 = 10840,6 \text{ рублей.}$$

Затраты на холодную воду:

$$C_{\text{ГВС}} = 10 \cdot 0,05 \cdot 3 \cdot 365 \cdot 61,1 = 33452,3 \text{ рубля.}$$

Затраты на питьевую воду:

$$C_{\text{ПВ}} = 10 \cdot 0,002 \cdot 3 \cdot 365 \cdot 29,7 = 650,4 \text{ рублей.}$$

Суммарные затраты на водоснабжение:

$$\sum C_{\text{вод}} = C_{\text{ХВС}} + C_{\text{ГВС}} + C_{\text{ПВ}}, \quad (124)$$

$$\sum C_{\text{вод}} = 10840,6 + 33452,3 + 650,4 = 44943,3 \text{ рубля.}$$

Расчет затрат на водоотведение при тарифе на водоотведение $9,72 \text{ руб}/\text{м}^3$ производится по формуле (123):

$$C_{\text{отв}} = 10 \cdot (0,1 + 0,05 + 0,002) \cdot 3 \cdot 365 \cdot 9,72 = 16178 \text{ рублей.}$$

Расчет затрат на текущий ремонт объекта при условии, что они составляют 1 % от стоимости объекта:

$$З_{т.р.} = 24300000 \cdot 0,01 = 243000 \text{ рублей.}$$

6.6 Расчет затрат на приобретение исходных веществ

Исходные вещества для проведения волоксации ОЯТ: облученное ядерное топливо, воздух и холодная вода. Оценить в денежном эквиваленте возможно только стоимость воды.

Расход воды в скруббере равен 1 м³ на 1000 м³ перерабатываемого воздуха, расход воздуха составляет 5 м³/ч в режиме псевдоожижения и 32 м³/ч – в режиме выгрузки основного количества волоксидированного ОЯТ из аппарата, который проводится 1 раз в час и в среднем занимает 4 часа в сутки. Суточный расход воздуха равен 168 м³/ч, тогда годовой расход воздуха – 61320 м³/ч. Следовательно, годовой расход воды составит 61,32 м³.

Затраты на воду за год составят:

$$З_{исх.в-ва} = 9,9 \cdot 61,32 = 607,1 \text{ рублей/год.}$$

6.7 Калькуляция стоимости производства

Проведем калькуляцию себестоимости участка волоксации ОЯТ. Волоксидированное ОЯТ является промежуточным продуктом в переработке ОЯТ и конечным продуктом на участке волоксации. В час получают 12,0617 кг/ч волоксидированного ОЯТ, в год, соответственно 104213,09 кг/год. Результаты расчетов представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Калькуляция себестоимости производства

Условно-переменные затраты				
Статьи затрат	Единицы измерения	Цена, рубли	Годовая норма	Сумма, рублей/год
Исходное вещество: Холодная вода	м ³	9,9	61,32	607,1
Транспортно-заготовительные работы (3 % от стоимости основных материалов)				18,2
Потребляемая оборудованием электроэнергия				10879941,9
Итого за условно-переменные затраты				10880567,2
Условно-постоянные затраты				
Статьи затрат				Сумма, рублей/год
Расходы на оборудование:				
Амортизация				835800
Ремонт				1002690
Содержание				417900
Фонд заработной платы				36324492
Отчисления на социальные нужды				10897348
Расходы на ОТ и ТБ				3632449
Расходы на участок:				
Освещение				250711,2
Вентиляция				835704
Отопление				263492,6
Потребление воды				44943,3
Амортизация				13500000
Ремонт				243000
Итого условно-постоянные затраты				68248530,1
Себестоимость производства				79129097,3

Расчет себестоимости единицы 1 кг волоксирированного ОЯТ:

$$C_{\text{ед}} = \frac{C_{\text{СП}}}{\Pi}, \quad (125)$$

где $C_{\text{СП}}$ – себестоимость производства, рубли;

Π – годовая производительность по продукту, кг/год.

$$C_{\text{ед}} = \frac{79129097,3}{104213,09} = 759,3 \text{ рубля/кг.}$$

6.8 Выводы по главе 6

В рассматриваемой главе были определены и рассчитаны основные статьи расходов на участок волоксации. К ним относятся: затраты на объект, затраты на оборудование, затраты на заработную плату персонала, эксплуатационные затраты и затраты на приобретение исходных веществ в год.

Исходя из заданной производительности участка, была рассчитана производственная мощность, которая составила 96203,4 кг. На основании величины производственной мощности были определены затраты на объект – его строительство и проведение санитарно-технических работ. Затраты на объект составили 159300000 рублей. Далее были определены затраты на покупку и монтаж оборудования, а также его амортизационные отчисления. Затраты на оборудование составили 12202680 рублей. После этого было рассчитано необходимое количество персонала для участка и определены их заработные платы. Также в данном разделе были рассчитаны затраты на социальные нужды и осуществление техники безопасности и охраны труда. Фонд заработной платы составляет 36324492 рубля, затраты на социальные нужды – 10897348 рублей, расходы на ОТ и ТБ – 3632449 рублей. Затраты на приобретение реагентов составили 607,1 рублей.

По результатам расчетов была определена себестоимость производства и промежуточного продукта. Себестоимость производства составила 79129097,3 рубля, а себестоимость одного килограмма промежуточного продукта – 759,3 рубля.

7 Социальная ответственность

Для сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности действует специальная система – охрана труда. Охрана труда включает в себя социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, учебно-профилактические, реабилитационные и другие мероприятия. Охрана труда основывается на научном подходе к анализу условий труда, технологического процесса, аппаратурного оформления и участвующих в производстве веществ на опасность возникновения в производственном процессе вредных или опасных факторов производства. На основе проведенного анализа создается ряд мероприятий по предупреждению опасных ситуаций и ликвидации вредных или опасных факторов производственной среды.

Законодательством регламентируются правовые и технические нормы в области охраны труда, предусмотрена система надзора и общественного контроля их выполнения, а также система ответственности за их нарушение. В основном охрана труда регламентируется с помощью Конституции РФ и Трудового Кодекса РФ. Должностные лица могут быть привлечены к дисциплинарной, административной и уголовной ответственности за указанные в документах нарушения.

7.1 Анализ вредных и опасных факторов производства

К физическим опасным и вредным производственным факторам участка волоксации ОЯТ относятся:

- опасность радиационного поражения (внутреннего и внешнего);
- опасность поражения электрическим током;
- опасность воздействия шума и вибрации оборудования на персонал;
- опасность поражения персонала электрическим током;
- опасность механического травмирования персонала;
- опасность возникновения пожара.

К веществам, которые могут негативно воздействовать на производственный персонал, участвующим или образующимся в процессе волоксации, можно отнести UO_2 , U_3O_8 , оксиды актинидов, лантанидов и других продуктов деления. Предельно допустимые концентрации и класс опасности [49] некоторых веществ [50] указаны в таблице 23.

Таблица 23 – Предельно допустимые концентрации веществ

Химическое соединение	ПДК, мг/м ³	Класс опасности
UO_2	0,075	1
U_3O_8	0,075	1
PuO_2	$9,1 \cdot 10^{-3}$ (Бк/м ³)	1
NpO_2	$2,6 \cdot 10^{-3}$ (Бк/м ³)	1
AmO_2	$1 \cdot 10^{-4}$ (Бк/м ³)	1
Cs_2O	0,3	2
SrO	1	3
BaO	0,5	2
Y_2O_3	2	3
La_2O_3	61,5	4
CeO_2	5	3
Sm_2O_3	5	2
ZrO_2	6	2
MoO_2	4	2
RuO_4	1	2

В помещении, в котором будет располагаться аппарат волоксации ОЯТ необходимо создать вентиляцию производственных помещений. Вентиляция позволяет создать нормальные санитарно-гигиенические условия на химических предприятиях. Процесс вентиляции позволяет из производственного помещения непрерывно удалять загрязненный воздух и одновременно подавать свежий воздух в таком количестве, при котором концентрация вредных веществ в воздухе будет ниже предельно допустимой, а температура, влажность и скорость движения воздуха соответствуют санитарным нормам [51].

7.2 Радиационная безопасность

При работе с радиоактивными веществами возникает опасность радиационного поражения организма человека. Радиоактивные вещества

могут попадать как на кожу человека, так и внутрь через органы дыхания или пищеварительный тракт. Поэтому необходимо правильно организовывать работу с такими веществами, соблюдать защитные меры и рекомендации.

Альфа-частицы имеют высокую ионизирующую способность и при попадании внутрь организма могут оказать разрушительное действие. Пробег альфа-частиц в воздухе составляет несколько сантиметров, в жидкости или биологических тканях – от 10 до 100 мкм. Для защиты от воздействия альфа-частиц можно использовать плотный материал любой толщины.

Бета-излучение – это поток β -частиц, обладающих меньшей ионизирующей способностью по сравнению с α -частицами, но большей проникающей способностью: в воздухе – несколько метров, в биологических тканях и жидкостях – несколько сантиметров. Для того чтобы защититься от бета-излучения можно использовать тонкий слой металла.

Гамма-излучение представляет собой поток γ -квантов, обладает наиболее высокой проникающей способностью среди всех видов излучения. Проникающая способность таких частиц зависит от их энергии, а также от свойств вещества. Проходя через вещество, гамма-квант теряет часть энергии, замедляется. Защититься от гамма-излучения возможно, используя специальные замедляющие барьеры, проходя через которые частицы теряют часть энергии. Например, для защиты от гамма-излучения ОЯТ на производстве по его переработке используют свинцовую, бетонную или железобетонную защиты. Помещения временного и постоянного пребывания персонала (бытовые комнаты и помещение с пультом оператора производственного процесса) защищены от участка волоксидации толстыми бетонными перекрытиями.

Радиоактивные вещества неравномерно распределяются в различных органах и тканях человека, поэтому и степень их поражения будет зависеть не только от величины дозы, принятой при воздействии излучения, но и от критического органа, в котором происходит накопление радиоактивных веществ, приводящее к поражению всего организма человека.

В таблице 24 представлены пределы доз в разных частях организма человека для населения и персонала группы А.

Таблица 24 – Пределы доз [52]

Величина	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет (не более 50 мЗв в год)	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет (не более 5 мЗв в год)
Эквивалентная доза за год:		
1) в хрусталике глаза;	150 мЗв	15 мЗв
2) в коже;	500 мЗв	50 мЗв
3) в кистях и стопах.	500 мЗв	50 мЗв

Отработавшее ядерное топливо имеет высокую радиоактивность порядка $1 \cdot 10^{16}$ Бк/т. Поэтому все производственные операции, проводимые с ним, необходимо по возможности автоматизировать. Весь процесс управления происходит оператором из специальной комнаты с пультом, имеющей биологическую защиту. Помещения, в которых непосредственно работают люди, защищают толстыми бетонными стенами. Работники участка волоксации относятся к персоналу группы А. Допустимая экспозиционная доза при шестичасовом рабочем дне равна 2,3 мкР/с.

Основные правила и нормативы обеспечения радиационной безопасности устанавливают требования по защите людей от вредного радиационного воздействия при всех условиях облучения от источников ионизирующего излучения, на которые распространяется действие СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» [53].

Цель защиты от радиоактивного излучения – не допустить превышения предельно допустимых доз (ПДД) внешнего и внутреннего облучения человека. ПДД зависит от категории облучения и группы критических органов. Группы критических органов по степени чувствительности:

I группа – все тело, красный костный мозг;

II группа – любой отдельный орган, кроме красного костного мозга, щитовидной железы, кожного покрова, предплечья, лодыжек и стоп;

III группа – костная ткань, щитовидная железа, кожный покров;

IV группа – руки, предплечья, ступни, лодыжки.

ПДД для персонала группы А представлены в таблице 25.

Таблица 25 – ПДД в зависимости от категории облучения и критических органов

Категория облучения	ПДД (бэр/год) при группе критических органов			
	I	II	III	IV
А – профессиональные работники	5	15	30	75

Суммарная доза облучения (в бэрах) всего организма, красного костного мозга не должна превышать:

$$D \leq 5 \cdot (N - 23), \quad (126)$$

где N – возраст человека, в годах;

23 – возраст человека к началу профессионального облучения.

Проектирование и строительство цеха по переработке ОЯТ, в том числе и участка волоксации необходимо выполнять в соответствии с ОСПОРБ-99/2010 [54]. Контроль должна производить служба радиационной безопасности на предприятии.

На основании общих правил работы с радиоактивными веществами, администрация предприятия должна разработать инструкции о правилах работы, содержании помещений и о мерах личной профилактики. Весь персонал перед выполнением работ должен быть ознакомлен с этими инструкциями, а факт ознакомления зафиксирован в специальном журнале. В административные обязанности также входит: организация труда; организация расположения и содержания рабочих мест, проёмов, проходов; обучение рабочих правилам ведения технологических процессов, технике безопасности и т.п.; осуществление технологического надзора

; ежегодная проверка знаний правил техники безопасности в квалификационных комиссиях и т.д. Результаты проведения инструктажа и экзамена рабочих фиксируются в контрольных книжках по охране труда и специальных журналах; специалистов и служащих – в журналах протоколов проверки знаний по радиационной безопасности.

Радиационная безопасность должна обеспечиваться за счет неперевышения установленного основного дозового предела, исключения всякого необоснованного облучения, снижения дозы до наиболее низкого возможного уровня, устойчивости системы безопасности к внешним и внутренним воздействиям, изоляции радиоактивности в случае возникновения аварии. Для контроля доз облучения эффективно применять носимые на теле индивидуальные дозиметры.

В соответствии с этими требованиями участок волоксации ОЯТ относится к I классу работ по работе с открытыми источниками излучения (более 10^8 Бк) [54]. Производственный участок должен быть выполнен по принципу разделения помещения на три зоны как и другие производственные помещения переработки ОЯТ:

- в первой зоне размещено технологическое оборудование и коммуникации с радиоактивной средой;
- во второй зоне – узлы дистанционного управления и электроприводы;
- в третьей зоне – пульт управления.

Помещение I зоны должно быть выполнено из железобетонных конструкций, облицованных изнутри коррозионностойкой сталью, а снаружи – бетоном. Прокладку трубопроводов необходимо выполнить в трубных коридорах, облицованных коррозионностойкой сталью и закрытых бетонными плитами. В помещениях должна быть предусмотрена механическая приточно-вытяжная вентиляция, с направлением воздушного потока из «чистой» зоны в «грязную».

В процессе проектирования, строительства и эксплуатации участка волоксации большое внимание должно уделяться вопросам герметизации

трубопроводов, первичных датчиков КИП и других систем, контактирующих с радиоактивными средами. При проведении ремонтных работ загрязненного оборудования необходимо проводить дезактивацию оборудования от радиоактивных веществ.

7.3 Ядерная безопасность

Обеспечение ядерной безопасности при использовании, переработке, хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов (ЯДМ) заключается в [55]:

- предотвращении возникновения самоподдерживающейся цепной реакции деления (СЦР);
- максимальном снижении тяжести последствий ядерной аварии.

В соответствии с принципами обеспечения ядерной безопасности предотвращение возникновения СЦР при обращении с ЯДМ достигается за счет:

- ограничений, налагаемых на геометрические форму и размеры оборудования;
- ограничений изотопного или радионуклидного состава ЯДМ;
- использования гомогенных или гетерогенных поглотителей нейтронов;
- ограничений помещаемой в оборудование массы ЯДМ с учетом его изотопного состава;
- ограничений концентрации ЯДМ;
- ограничений массовых долей замедлителей нейтронов в ЯДМ;
- ограничений, накладываемых на отражатели нейтронов и на взаимное размещение оборудования;
- организационных и технических мер по снижению вероятности возникновения СЦР.

В состав облученного топлива входят делящиеся элементы, накопление которых может привести к началу самопроизвольной цепной реакции деления

(СЦР). К таким элементам относятся: ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Cm , ^{245}Cm , ^{247}Cm , ^{249}Cf , ^{251}Cf . Рассмотрим их возможное содержание в ОЯТ из реактора ВВЭР-1000. Изотоп U^{233} не образуется в ходе кампании реактора на урановом топливе. В таблице 26 приведен состав топлива для ВВЭР-1000 в конце облучения.

Таблица 26 – Результаты измерения удельного содержания изотопов актинидов в образце ОЯТ ВВЭР-1000 на конец облучения [56]

U		Pu		Am		Cm	
изотоп	Содержание, кг/т(U)	изотоп	Содержание, кг/т(U)	изотоп	Содержание, г/т(U)	изотоп	Содержание, г/т(U)
238	983,54±1,29	238	0,43±0,02	241	5,8±0,1	243	0,73±0,72
236	6,60±0,22	239	6,75±0,02	242	1,2±0,4	244	93±6
235	9,62±0,16	240	3,11±0,01	243	212±6	245	5,4±0,6
234	0,24±0,03	241	2,06±0,01			246	0,40±0,16
		242	0,950±0,006				

Рассчитаем, сколько содержится нуклидов в 100 тоннах, перерабатываемых в год, а также, сколько может содержаться нуклидов одновременно в аппарате при производительности 11,63 кг/ч по ОЯТ, основываясь на таблице 25.

Для сравнения приведем минимальные и безопасные критические массы нуклидов в таблице 27.

Таблица 27 – Минимальные критические массы и безопасные массы нуклидов [57]

Нуклид	М _{кр} , кг	М _б , кг
Нечетное число нейтронов		
²³³ U	0,57	0,271
²³⁵ U	0,79	0,376
²³⁹ Pu	0,51	0,242
²⁴¹ Pu	0,232	0,11
^{242m} Am	0,017	0,0081
²⁴³ Cm	0,108	0,051
²⁴⁵ Cm	0,036	0,017
²⁴⁷ Cm	1,170	0,557
²⁴⁹ Cf	0,047	0,022
²⁵⁴ Cf	0,013	0,006
Четное число нейтронов		
²³¹ Pa	550	262
²³⁷ Np	43	20,5
²³⁸ Pu	4,5	2,14
²⁴⁰ Pu	96	45,7
²⁴² Am	71	33,8
²⁴³ Am	500	238
²⁴⁴ Cm	14	6,7

В таблице 28 приведено содержание нуклидов в облученном топливе, поступающей на переработку.

Таблица 28 – Содержание нуклидов в ОЯТ при переработке

Нуклид	m, кг/100 т ОЯТ (в год)	m, кг/11,63 кг ОЯТ (в час)
²³⁵ U	962	0,11
²³⁹ Pu	675	0,08
²⁴¹ Pu	311	0,04
²³⁸ Pu	43	0,005
^{242m} Am	0,58	$67,5 \cdot 10^{-6}$
²⁴² Am	0,12	$13,9 \cdot 10^{-6}$
²⁴³ Am	21,2	$2,47 \cdot 10^{-3}$
²⁴³ Cm	0,073	$8,49 \cdot 10^{-6}$
²⁴⁴ Cm	9,3	$1,1 \cdot 10^{-3}$
²⁴⁵ Cm	0,54	$62,8 \cdot 10^{-6}$

На основе данного теоретического расчета можно сделать вывод о том, что при загрузке аппарата по ОЯТ 11,63 кг/ч и при условии, что топливо в аппарате находится около 1 часа, не возникает угрозы возникновения СЦР. Для того чтобы обеспечить ядерную безопасность в аппарате он должен быть

выполнен таким образом, чтобы в нём не происходило накопление нуклидов в щелях или углах, а также в резьбовых и иных соединениях.

7.4 Санитарно-гигиенические мероприятия

Работа персонала предусматривается с обязательным использованием средств индивидуальной защиты. Лица, работающие с радиоактивными веществами, после выполнения работ должны пройти санитарный пропускник, дозиметрический контроль, принять душ.

Все работники один раз в год должны проходить медицинское обследование.

Лица, работающие на работах I класса, должны иметь при себе личный дозиметр. В помещениях должны осуществляться [53]:

- очистка и вентиляция воздушной среды;
- поддержание нормальных микроклиматических условий (отопление, водоснабжение, канализация);
- дозиметрический контроль;
- контроль за соблюдением правил личной гигиены;
- достаточное освещение;
- устройство оборудованных санитарно-бытовых помещений, комнат отдыха, мест производственной гимнастики и т.д.

В случае загрязнения радиоактивными веществами, личная одежда и обувь подлежат дезактивации под контролем службы радиационной безопасности не реже одного раза в неделю, а в случае невозможности дезактивации – захоронению как радиоактивные отходы. Плёночные, резиновые средства индивидуальной защиты, как правило, после каждого использования подвергаются предварительной дезактивации в санитарном шлюзе или в другом специально отведённом месте. При переходах из помещений для работ более высокого класса в помещения для работ более низкого класса необходимо контролировать уровни радиоактивного загрязнения средств индивидуальной защиты, особенно спецобуви и рук.

В помещениях для работ с радиоактивными веществами запрещается:

- пребывание сотрудников без необходимых средств индивидуальной защиты;
- хранение пищевых продуктов, табачных изделий, домашней одежды, косметических принадлежностей и других предметов, не имеющих отношения к работе;
- приём пищи, курение, пользование косметическими принадлежностями;
- выход в спецодежде и спецобуви за пределы данного помещения.

7.5 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационно-технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества. Электрический ток на организм человека может оказывать термическое, электролитическое и биологическое воздействие, которое может привести к необратимым последствиям.

Под действием электрического тока в организме человека происходят нарушения дыхания, работы сердца, кровообращения, обмена веществ. Характер и последствия поражения человека электрическим током зависит от величины тока, частоты, продолжительности его воздействия, а также от того, было поражение тока общим или местным и т.д.

Безопасным для человека является переменный ток величиной 10 мА, постоянный – 50 мА; безопасное напряжение – 12 В. Основными видами опасности и мерами борьбы с ними являются [58]:

- 1) опасность удара током при прикосновении (для защиты от напряжения прикосновением необходима изоляция токоведущих частей, предупредительная сигнализация);

2) опасность напряжения перехода (для защиты от напряжения перехода необходимо защитное заземление);

3) опасность токов короткого замыкания (для защиты от токов короткого замыкания необходима быстродействующая токовая автоматическая защита);

4) опасность шагового напряжения (для защиты от шагового напряжения необходимы токонепроводящие полы);

5) опасность токов перегрузки (при авариях) (для защиты от токов перегрузки необходимо автоматическое отключение, установка плавких предохранителей).

При выполнении ремонтных работ производится отключение установки от источника напряжения, снятие предохранителей и другие мероприятия, обеспечивающие невозможность ошибочной подачи напряжения к месту работы.

Для защиты людей от поражения током в цехе изолируются провода, устанавливаются механические ограждения, знаки опасности, защитное заземление.

Индивидуальные средства защиты от поражения электрическим током бывают основные (оперативные штанги, клещи, диэлектрические перчатки, инструменты с изолированными ручками и индикаторы напряжения) и дополнительные (диэлектрические галоши, коврики, переносное заземление).

Основными мерами защиты работника от поражения электрическим током являются:

- проведение регулярных инструктажей по электробезопасности;
- правильное устройство и эксплуатация электрического оборудования и токоведущих частей;
- защита от прикосновения к токоведущим частям;
- защита от перехода напряжения на нетоковедущие части оборудования;
- наличие блокировочных и сигнальных устройств, предупредительных плакатов и надписей;

- применение индивидуальных средств защиты;
- обязательное заземление всех аппаратов.

Участок волоксации должен относиться к первому классу электробезопасности [58] (помещения без повышенной опасности). В помещении соблюдаются условия: температура ниже 35 °С, влажность ниже 75 %, оборудование имеет заземление.

Аппараты, находящиеся на линии волоксации ОЯТ соединены друг с другом воздушным потоком, с помощью которого осуществляется движение частиц ОЯТ от одного аппарата к другому. Поэтому необходимо предусмотреть действия, связанные с непреднамеренным отключением электрического тока на участке. Воздушный насос, теплообменный аппарат для нагрева воздуха, электрические нагреватели для аппарата волоксации, а также и другие аппараты, работа которых зависит от наличия электрического тока, должны быть подключены к независимому источнику энергии, который в случае аварийной ситуации сможет заменить на время устранения неполадок основной источник энергии.

7.6 Защита от механического травмирования

Основными причинами механического травмирования на производстве являются [59]:

- неисправность оборудования и коммуникаций;
- несовершенство или неисправности инструментов (ушибы, порезы и т.д.);
- отсутствие ограждений и предохранительных устройств (падение человека с высоты, падение предметов и т.п.);
- неправильная организация труда;
- неудовлетворительная организация рабочих мест, их расположения и содержания;
- нарушение инструкций и требований техники безопасности;
- использование не предназначенных для данной работы инструментов.

Для предотвращения угрозы механического травмирования при использовании и эксплуатации оборудования должно быть предусмотрено следующее:

- все движущиеся, острые и представляющие опасность части механизмов должны иметь ограждения;
- окраска машин и механизмов в соответствующие цвета, что способствует предотвращению несчастных случаев;
- установка предупредительных знаков;
- ограждающие перила, расположенные выше, чем на 0,3 м над уровнем пола, площадки и имеющиеся более трёх ступеней лестницы, переходные или рабочие площадки над машинами, траншеями, бункерные ямы, должны иметь ограждения высотой не менее 1 м. в нижней части перила должны иметь сплошную стенку не менее 150 мм;
- установка всевозможных сигнализирующих устройств;
- наличие индивидуальных средств защиты (каска, пояс и ремень безопасности).

7.7 Защита от шума и вибрации

Шум и вибрация различаются частотой колебаний в секунду. Если число колебаний в секунду не превышает 16 Гц, то они воспринимаются человеком как сотрясения и называются вибрацией. Частота колебаний от 16 до 20000 Гц в секунду воспринимается органами слуха как шум.

Вибрация вызывает вибрационную болезнь, заболевания сердечно-сосудистой системы, нервной системы, снижение слуха. Воздействие вибрации на организм человека может стать причиной снижения работоспособности, ослабления памяти, внимания, остроты зрения, что увеличивает возможность производственного травматизма.

Воздействие шума на организм может проявляться в виде специфического поражения органа слуха, нарушений со стороны ряда других органов, снижения производительности труда, повышения уровня

травматизма. Снижение слуха, как правило, развивается после 5-7 лет работы в условиях повышенного уровня шума.

Предельно допустимый уровень производственного шума не должен превышать 85 дБ [60]. Источниками шума в химической промышленности являются: компрессоры, движущиеся детали механизмов, вентиляционные системы, сила звука которых, обычно, не превышает 70 дБ.

Для устранения шума и вибрации применяется комплекс организационно-технических мероприятий, включающий в себя:

- размещение оборудования, являющегося источником шума, в отдельных помещениях;
- расположение цехов с повышенным уровнем шума в отдалении от малошумящих помещений;
- применение индивидуальных средств защиты от шума и вибрации;
- изоляция фундаментов под виброактивное оборудование с учетом динамических нагрузок;
- звукоизоляция привода шумных частей механизмов кожухом;
- своевременная профилактическая работа по обслуживанию оборудования.

7.8 Пожарная безопасность

Если в производственной среде присутствуют одновременно горючие вещества и окислитель (кислород или воздух), а также возможность возникновения импульса воспламенения (искры), то существует опасность возникновения возгорания и пожара [61].

Для предотвращения угрозы возникновения возгорания перед началом работ проводится инструктаж по правилам пожарной безопасности и использованию средств пожаротушения.

К основным требованиям пожарной безопасности относятся:

- содержание территорий, зданий и помещений должны соответствовать требованиям пожарной безопасности;

- наличие, правильное размещение и использование средств пожаротушения.

Производство по переработке облученного ядерного топлива относится к категории А по пожаро- и взрывобезопасности [61]. В технологических процессах участвуют вещества и материалы, склонные к возгоранию или взрыву при взаимодействии с водой, воздухом, химическими реагентами, или при повышенных температурах. Общими мерами по обеспечению пожарной безопасности при проведении технологических процессов являются:

- проведение регулярных инструктажей по пожаро- и взрывобезопасности;
- замена опасных технологических операций менее опасными;
- изолирование опасных технологических установок и оборудования;
- уменьшение количеств, находящихся в одном помещении, горючих и взрывоопасных веществ;
- механизация, автоматизация и непрерывность производства;
- строгое соблюдение стандартов и точное выполнение установленного технологического режима;
- предотвращение распространения пожаров и взрывов.

На участке должны быть пожарные краны, химические пенные, а также порошковые огнетушители, кошма, песок для гашения огня на электрооборудовании, а также противопожарный инвентарь: ведра, багры, ломы, крючья, топоры и т.д., установленные на щитах согласно нормам противопожарной безопасности. Во всех производственных помещениях устанавливается автоматическая пожарная сигнализация и средства пожаротушения: огнетушители, пожарные щиты, системы пожарного водоснабжения. При возникновении пожара персонал обязан сообщить в пожарную охрану, остановить технологический процесс и принять меры по эвакуации людей и локализации пожара. Эвакуация людей при пожаре осуществляется по действующей схеме.

7.9 Производственное освещение

Для безаварийной работы на химических предприятиях одним из обязательных условий является наличие правильного освещения. Недостаточная или неправильная освещённость территории, дорог, установок, подходов к аппаратам и лестничным пролётам может привести к несчастным случаям.

Рациональное освещение производственных помещений необходимо для соблюдения санитарно-гигиенических правил на производстве. Правильно рассчитанное освещение предупреждает развития у работников возникновения заболеваний, связанных со зрением, и снижает риск производственного травматизма.

Единицей освещённости является люкс (Лк). Показатели степени освещённости измеряются люксметром. Степень освещённости в производственных помещениях нормируется, норма освещения составляет 300 Лк, разряд точности работ – II [62].

Освещение на предприятии должно быть равномерным и устроено так, чтобы не возникало «ослепленности» работников из-за отражения света от поверхностей. Это достигается правильным устройством осветительных приборов, определённой высотой подвеса светильников и их рациональным размещением в помещении.

Производственные помещения химических заводов оснащены аварийным освещением на случай остановки или отключения основного освещения. Аварийное освещение по своему назначению подразделяется на два вида: для эвакуации людей из помещения и для продолжения работ.

Для эвакуации людей уровень освещённости на полу по линии основных проходов должен быть не менее 30 Лк. Аварийное освещение для продолжения работы должно быть обустроено в таких помещениях, в которых из-за отсутствия освещения, могут произойти ошибочные действия работников, нарушающие технологический процесс, или приводящие к

возможности возникновения пожара и несчастных случаев. Аварийное освещение должно обеспечить на рабочих поверхностях освещённость не менее 10 % от нормы освещённости.

Светильники аварийного освещения присоединяют к независимому источнику питания электроэнергией, они включаются автоматически при выключении основного освещения. Неблагоприятно влияет на уровень освещенности загрязнение стен и потолка, из-за этого уровень освещения может снизиться на 10-30 %. Поэтому необходимо, чтобы своевременно происходила смена вышедших из строя ламп, очищались запыленные или загрязненные светильники, а также стены и потолок.

Для освещения проектируемого участка цеха можно использовать LED-лампы мощностью 14 Вт.

Определим световой поток для светодиодных ламп мощностью 14 Вт:

$$F = R_a \cdot P, \quad (127)$$

где $R_a = 80 \text{ Лм/Вт}$ – индекс цветопередачи для лампы типа LED.

$$F = 80 \cdot 14 = 1120 \text{ Лм.}$$

Необходимое количество ламп для проектируемого участка цеха:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot z \cdot k}{K \cdot F \cdot n}, \quad (128)$$

где E – освещенность, Лк (при системе общего освещения $E = 300 \text{ Лк}$);

K – переходный коэффициент, 4,5;

n – коэффициент использования светового потока осветительной установки, 45 %;

k – коэффициент запаса, 4,5;

S – площадь освещаемого помещения, 450 м^2 ;

z – поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность освещения, 0,9.

$$N = \frac{300 \cdot 450 \cdot 0,9 \cdot 4,5}{4,5 \cdot 1120 \cdot 0,45} = 241,07 \text{ шт.}$$

Рассчитанное значение количества ламп округляем в большую сторону до целого числа. Тогда при использовании для освещения LED-ламп в

помещении с участком волоксации для поддержания уровня освещения 300 Лк необходимо 242 лампы.

7.10 Вентиляция

Для создания организованного воздухообмена с целью удаления из производственного помещения загрязненного и перегретого воздуха с подачей чистого и охлажденного применяют искусственную вентиляцию [63].

Участок цеха волоксации оборудован системой очистки воздуха, используемого для окисления облученного топлива. Для того чтобы очистить воздух и собрать максимально возможное количество частиц ОЯТ, перед отправлением воздуха в атмосферу используется система из пяти аппаратов: два аппарата типа циклон, два аппарата типа фильтров тонкой очистки и насадочный скруббер для мокрой доочистки воздуха от радиоактивных частиц облученного топлива.

Помещение участка волоксации должно быть оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией с направленным движением воздуха из «чистой» зоны в «грязную». Вентиляция позволяет из производственного помещения непрерывно удалять загрязненный воздух и одновременно подавать свежий воздух в таком количестве, при котором концентрация вредных веществ в воздухе будет ниже предельно допустимой, а температура, влажность и скорость движения воздуха соответствуют санитарным нормам.

Кратность воздухообмена для производственных помещений без естественной вентиляции соответствует 10 [64].

Производительность по кратности воздухообмена рассчитывается по формуле:

$$L=n \cdot S \cdot H, \quad (129)$$

где n – кратность воздухообмена в производственном помещении;

S – площадь помещения, м^2 ;

H – высота помещения, м.

$$L=10 \cdot 450 \cdot 10=45000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для помещения с участком окисления общей площадью 450 м² производительность по кратности воздухообмена должна составлять 45000 м³/ч. Данную производительность воздухообмена могут обеспечить, например, три вентилятора ВР2Н-6,3 с мощностью 11 кВт, частота обращения которых 1500-1600 об/мин, исполнение вентиляторов должно быть взрывозащищенным [65]. В качестве электродвигателей для вентиляторов могут быть использованы двигатели АИР132М4 с мощностью 11 кВт [66].

7.11 Микроклимат

Санитарные правила устанавливают гигиенические требования к показателям микроклимата рабочих мест производственных помещений с учетом интенсивности энергозатрат работающих, времени выполнения работы, периодов года и содержат требования к методам измерения и контроля микроклиматических условий.

Показатели, характеризующие микроклимат в производственных помещениях:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

Работа оператора на участке окисления относится к категории Іб. Оптимальные параметры микроклимата должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 29 [67].

Таблица 29 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по урону	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
-------------	--------------------------	-------------------------	------------------------------	------------------------------------	--------------------------------

	энергозатрат, Вт				
Холодный	Іб (140-174)	21-23	20-24	40-60	0,1-0,2
Тёплый	Іб (140-174)	22-24	21-25	40-60	0,1-0,2

7.12 Возможные аварийные ситуации

Основные возможные аварийные ситуации на участке волоксации ОЯТ:

- возникновение пожара;
- разгерметизация оборудования;
- возникновение СЦР.

Производственный участок волоксации ОЯТ относится к категории А по взрыво- и пожаробезопасности. Поэтому на данном производстве необходимо строго соблюдать меры предупреждения возникновения возгораний. Основные мероприятия, направленные на предупреждение данной чрезвычайной ситуации указаны в пункте 6.8 «Пожарная безопасность».

На случай возникновения пожара на участке волоксации ОЯТ должны быть предусмотрены условия для его тушения без непосредственного участия человека на начальной стадии. Для этого должны быть установлены устройства для автоматического включения порошковых, углекислотных или воздушно-пенных огнетушителей. В случае возникновения пожара необходимо остановить подачу воздуха и ОЯТ в аппараты, так как они могут воспламеняться. Также воздух может быстро передать огонь из одного аппарата в другой из-за его высокой скорости. Оператор участка волоксации обязан следовать инструкции на случай возникновения пожара, оповестить пожарную охрану и руководителей производства, а также коллег для немедленной эвакуации. Так как работа с аппаратами участка волоксации ведется дистанционно с помощью автоматизации и удаленного регулирования процесса, то должно быть предусмотрено автоматическое блокирование

доступа в помещение свежего воздуха, чтобы пожар не распространялся по вентиляционным трубам.

Для предотвращения возможной разгерметизации аппаратов и арматуры необходимо проводить плановые технические осмотры на выявление повреждений и неисправностей оборудования и трубопроводов, по которым происходит передвижение воздушного потока, загрязненного радиоактивными частицами ОЯТ. Также все соединения на данном технологическом участке выполняются с помощью сварки для исключения накоплений ядерных материалов в зазорах соединений.

На случай разгерметизации оборудования необходимо создание специальной инструкции для оператора. В случае разгерметизации оборудования велика опасность попадания радиоактивных частиц ОЯТ в помещение с аппаратами. Каждый аппарат находится в бетонной защите с крышкой, которые выполняют биологическую защиту, но не являются полностью герметичными. Поэтому оператор следит за перепадом давления в трубопроводах и аппаратах с помощью датчиков давления, установленных на входе и выходе из всех аппаратов. В случае явно выявленной разгерметизации оператор должен остановить подачу воздуха и ОЯТ в аппараты, а также осуществить остановку работы вентиляционной системы для предотвращения вывода большого количества радиоактивных частиц в систему воздухоочистки и атмосферу.

Для предотвращения возникновения СЦР на производстве по переработке ОЯТ необходимо установить систему, которая бы могла отслеживать нейтронное или фотонное излучение ядерных материалов, а также передавать информацию на щит оператора. Система непрерывно фиксирует нейтронное и гамма-излучение, в случае превышения дозы 0,1 Гр (10 рад) [55] срабатывает световая и звуковая сигнализация, персонал должен покинуть ядерноопасную зону.

В случае возникновения СЦР персонал обязан действовать согласно специальной инструкции, составленной на случай возникновения СЦР, а

также действовать согласно плану ликвидации аварий, связанных с возникновением СЦР. Должны быть подготовлены меры для перевода системы в подкритическое состояние, после проведения данного мероприятия должна быть проведена проверка полного числа делений СЦР. Доступ персонала в помещение, в котором произошла авария, разрешается только после проведения необходимой диагностики и анализа причин и последствий аварии.

7.13 Выводы по главе 7

В данной главе были проанализированы вредные и опасные факторы производства на участке волоксации ОЯТ: опасность радиационного поражения (внутреннего и внешнего), опасность поражения электрическим током, опасность воздействия шума и вибрации оборудования на персонал, опасность поражения персонала электрическим током, опасность механического травмирования персонала и опасность возникновения пожара. Для технологического процесса установлены нормированные параметры по данным производственным факторам, а также подобраны средства коллективной и индивидуальной защиты для персонала.

А также были рассмотрены такие важные факторы производственного процесса как микроклимат производственных помещений, вентиляция и производственное освещение. Соблюдение норм по данным параметрам напрямую влияет на работоспособность персонала и предупреждение развития профессиональных заболеваний.

Определено, что разработанный участок относится к категории А по взрыво- и пожаробезопасности и к 1 классу по электробезопасности. По работе с открытыми источниками излучения участок волоксации ОЯТ относится к I классу работ. По микроклиматическим условиям работа персонала (оператора) относится к Ib категории, а по нормируемой освещенности ко II разряду.

Были описаны возможные чрезвычайные ситуации для участка волоксации, а также разработаны меры по их упреждению и предотвращению.

Была предложена приточно-вытяжная вентиляция кратностью воздухообмена 10. Такую производительность обеспечат три вентилятора марки ВР2Н-6,3 во взрывозащищённом исполнении, на них устанавливаются двигатели АИР132М4, мощностью 11 кВт и частотой вращения 1500 об/мин, так же предусмотрено установка дополнительно двух вентиляторов, идентичных основным, для непрерывного воздухообмена во время ремонта и обслуживания основных вентиляторов.

Заключение

В результате выполнения дипломной работы разработан участок волоксации ОЯТ, включающий стадию волоксации, стадию пылеочистки и санитарную очистку. Участок волоксации является частью цеха по переработке ОЯТ.

В ходе выполнения работы был выполнен литературный обзор по данной теме, включающий в себя изучение состава и характеристики ОЯТ, теорию процесса волоксации и рассмотрение возможного аппаратного оформления волоксации. В качестве основного аппарата для проведения процесса был выбран аппарат с псевдоожиженным слоем, а в качестве окислительного реагента – воздух.

Использование аппарата с псевдоожиженным слоем для волоксации позволит максимально возможно интенсифицировать процесс и поддерживать необходимую температуру окисления, а использование воздуха в качестве окислителя позволяет снизить затраты на подготовку окислителя к волоксации и дальнейшую очистку газовой фазы с последующей безопасной его утилизации.

Был произведен расчет и чертеж основного аппарата. Также были составлены принципиальная и аппаратурно-технологическая схемы процесса. Также было подобрано основное и вспомогательное оборудование для участка, составлен план размещения оборудования.

Разработана схема автоматизации процесса волоксации и определены регулируемые и регистрируемые параметры процесса.

Проведены технико-экономические расчеты. В работе приведены расчеты производственной мощности основного технологического оборудования, определены основные переменные и постоянные затраты производственного участка, определена его себестоимость и себестоимость одного килограмма волоксированного ОЯТ – 759,3 рубля.

В разделе «Социальная ответственность» рассмотрены основные вредные и опасные производственные факторы, влияющие на безопасное выполнение работ. Разработаны мероприятия по защите персонала. Также определены характеристики участка цеха. Определено, что разработанный участок относится к категории А по взрыво- и пожаробезопасности и к 1 классу по электробезопасности. По работе с открытыми источниками излучения участок волоксации ОЯТ относится к I классу работ. По микроклиматическим условиям работа персонала (оператора) относится к Ib категории, а по нормируемой освещенности ко II разряду.

Список использованных источников

- 1 Землянухин В.И. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС / В.И. Землянухин, Е.И. Ильенко, А.Н. Кондратьев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
- 2 Расчет SF-коэффициентов для продуктов деления в топливе топливного реактора ВВЭР-1000 / Э.А. Рудак, О.И. Ячник, Н.В. Максименко, В.В. Андреев. – Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого № 4, 2010. – 45-53 с.
- 3 Громов Б.В. Химическая технология облученного ядерного топлива: учебник для вузов / Б.В. Громов, В.И. Савельева, В.Б. Шевченко. – М.: Энергоатомиздат, 1983, - 352 с. с ил.
- 4 Исследование процесса окисления ОЯТ при повышенной температуре / В.И. Мацеля и др.; науч. рук. И.И. Жерин. – Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – 201 с.
- 5 Способ окислительной обработки (волоксидации) облученного ядерного топлива / Патент России № 2654536. 2018. Бюл. № 15. / П.М. Гаврилов, И.А. Меркулов, Д.В. Друзь и др.
- 6 Термохимическое охрупчивание циркониевой оболочки твэла и окислительная перекристаллизация топливной композиции при переработке ОЯТ / М.М. Металиди, С.В. Шаповалов, Р.В. Исмаилов и др. – Радиохимия, т. 57, № 1, 2015. – с 86-89.
- 7 Карелин В.А. Технология переработки облученного ядерного топлива: учебное пособие / В.А. Карелин, А.Н. Страшко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – 89 с.
- 8 Опытнo-демонстрационный центр ГХК: задачи, технологии, перспективы [Электронный ресурс] / Атомная энергия 2.0. URL:

<https://www.atomic-energy.ru/technology/33473>, свободный, - Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 21.10.2020 г.

9 Сударикиов Б.Н. Процессы и аппараты урановых производств. Под ред. д.т.н. Б.В. Громова / Б.Н. Сударикиов, Э.Г. Раков. – М.: «Машиностроение», 1969. – 366 с.

10 Исламов М.Ш. Печи химической промышленности. Изд. 2-е, пер. и доп. / М.Ш. Исламов. – М.: Химия, 1975 г. – 432 с.

11 Элементный и изотопный состав ОЯТ [Электронный ресурс] / Лекции И.Н. Бекмана. URL: http://profbeckman.narod.ru/RH0.files/26_4.pdf, свободный. Яз. рус. Дата обращения 21.10.2020.

12 Вдовенко В.М. Химия урана и трансураниевых элементов / В.М. Вдовенко. – Ленинград: Изд-во академии наук СССР, 1960. – 700 с.

13 Вейгель Ф. Химия актиноидов, в 3 т. Том 2 / Ф. Вейгель, Д. Кац, Г. Сиборг и др. – М.: Мир, 1997. – 654 с.

14 Плотность, теплопроводность, теплоемкость кислорода [Электронный ресурс] / Справочные данные. URL: <http://thermalinfo.ru/svojstva-gazov/neorganicheskie-gazy/plotnost-teploprovodnost-teploemkost-kisloroda>, свободный. Яз. рус. Дата обращения 22.10.2020 г.

15 Химический состав воздуха и его влияние на организм [Электронный ресурс] / Справочник. URL: https://spravochnick.ru/medicina/himicheskiy_sostav_vozduha_i_ego_vliyanie_na_organizm/, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 22.10.2020 г.

16 Физические свойства воздуха: плотность, вязкость, удельная теплоемкость [Электронный ресурс] / Справочные данные. URL: <http://thermalinfo.ru/svojstva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svojstva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 22.10.2020 г.

17 Плотность азота, свойства жидкого и газообразного N₂ [Электронный ресурс] / Справочные данные. URL: <http://thermalinfo.ru/svojstva->

gazov/neorganicheskie-gazy/plotnost-i-svoystva-azota-teploprovodnost-azota-n2,

свободный. Яз. рус. Дата обращения: 22.10.2020 г.

18 База данных физико-химических свойств и синтезов веществ [Электронный ресурс] / База данных. URL: <http://chemister.ru/Database/search.php>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 24.10.2020 г.

19 ГОСТ 13268-88. Электронагреватели трубчатые. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 15 с.

20 ГОСТ 9931-85. Корпуса цилиндрические стальных сварных аппаратов и сосудов. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 23 с.

21 ГОСТ 6636-69. Основные нормы взаимозаменяемости. – М.: Издательство стандартов, 1970. – 8 с.

22 ГОСТ 12620-78. Днища конические неотбортованные с углами при вершине 60, 90 и 120°. Основные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 33 с.

23 Расчет шнекового транспортера: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Оборудование производств редких элементов» для студентов IV курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики / сост. Тураев Н.С., Брус И.Д., Кантаев А.С.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 17 с.

24 ГОСТ 5949-2018.Metalлопродукция из сталей нержавеющей и сплавов на железоникелевой основе коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018. – 32 с.

25 АТК 24.200.03-90. Опоры-стойки вертикальных аппаратов. – М.: Издание официальное. – 13 с.

26 ТВС реактора ВВЭР-1000 [Электронный ресурс] / Ядерная физика. URL: <https://sites.google.com/site/alexianon/chtivo/nuclear/tvs-reaktora-vver-1000>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 25.10.2020 г.

27 Способ нагрева потока воздуха и устройство / Патент России № 2280821. F24H 3/04 / Ю.Л. Котельников, А.Л. Семёнов, Н.М. Белянин и др.

28 Пневмотранспорт сыпучих материалов [Электронный ресурс] / Описание решения. URL: <https://www.air-energy.ru/industries/kompressory/pnevmotransport-sypuchikh-materialov/>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 27.10.2020 г.

29 Выбор и расчет средств по пылегазоочистке воздуха: Методические указания к практической работе по курсу «Безопасность жизнедеятельности» / сост. А.А. Волкова, Е.В. Шашмурина; Уральский государственный технический университет. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – 16 с.

30 Габаритные размеры циклонов [Электронный ресурс] / Промышленное оборудование. URL: http://www.pritok44.ru/prod/cikloni_cn-11/gabaritnie_razm, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 29.10.2020 г.

31 Аппаратурное обеспечение систем газоочистки гидromеталлургических операций переработки облученного топлива / О.А. Устинов, А.Ю. Шадрин, С.А. Якунин и др. – Вопросы атомной науки и техники, № 2, 2018. – с. 82-95.

32 Фильтры для очистки газов от радиоактивных аэрозолей [Электронный ресурс] / Каталог продукции. URL: <https://centrotech.ru/catalog/filters/filtry-dlya-ochistki-gazov-ot-radioakt/>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 10.11.2020 г.

33 Скруббер [Электронный ресурс] / Насадочные скрубберы. URL: <https://plast-product.ru/skrubber/#z4>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 11.11.2020 г.

34 НП 013-99. Установки по переработке отработавшего ядерного топлива. Требования безопасности. – М. Госатомнадзор России, 1999. – 16 с.

35 Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: Справочник / А.И. Ящура. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 360 с

36 Черняк Т.В. Управление кадровыми ресурсами на современном предприятии. – Новосибирск: СибАГС, 2006, – 168 с.

37 Техничко-экономическое обоснование проектирования цеха химического производства: Учебное пособие / Е.Л. Бойцова, Ф.А. Ворошилов, Е.В. Меньшикова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – 85 с.

38 Голубятников В.А. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности / В.А. Голубятников, В.В. Шувалов – М.: «Химия», 1985. – 350 с.

39 Мелюшев Ю.К. Основы автоматизации химических производств и техника вычислений. 2-е изд., перераб и доп. – М.: Химия, 1982.

40 Вихревой расходомер ЭМИС-вихрь 200 [Электронный ресурс] / Измерение расхода газа, пара, жидкости. URL: http://emis-kip.ru/ru/prod/vihrevoj_rashodomer/, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 15.11.2020 г.

41 Преобразователи частоты Siemens Sinamics G 110 [Электронный ресурс] / «МехПривод». URL: <http://www.mechprivod.ru/katalog/preobrazovateli-chastoty/siemens/sinamics-g-110.html>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 16.11.2020 г.

42 Ультразвуковые уровнемеры для жидкостей и сыпучих продуктов [Электронный ресурс] / Индуктивный датчик – техническая спецификация. URL: <http://www.ste.ru/krohne/optisound1.html>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 17.11.2020 г.

43 Датчик температуры для плоской поверхности [Электронный ресурс] / Компания «Vec-ing». URL: <http://www.vec-ing.ru/?do=menu&id=48848>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 19.11.2020 г.

44 АО научно-производственное предприятие Эталон [Электронный ресурс] / Информационный портал. – URL: <https://www.tdetalon.com/termopreobrazovateli-soprotivleniya/platinovye/tsp->

0303-termopreobrazovately-soprotivleniya/, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 24.11.2020.

45 LiveDrive [Электронный ресурс] / Датчики давления для высоких температур. – URL: <https://linedrive.ru/catalogue/sensors/melt/kn/>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 25.11.2020 г.

46 Расходомер-счетчик [Электронный ресурс] / Ультразвуковой расходомер Prosonic Flow 92F. URL: <https://www.ru.endress.com/ru/Tailor-made-field-instrumentation/Flow-measurement-product-overview/ultrazvukovoj-rasxodomer-Prosonic-Flow-92F>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 27.11.2020 г.

47 Поточный нефелометр AquaScat S (in-line) [Электронный ресурс] / Автоматический контроль мутности и взвешенных частиц в жидкостях. URL: <https://www.sigrist.ru/catalog/avtomaticheskij-kontrol-mutnosti-i-vzveshennykh-chastits-v-zhidkostyakh/potochnyy-nefelometr-aquascats-in-line/>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 1.12.2020 г.

48 Оборудование радиационного контроля [Электронный ресурс] / Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения. URL: <http://www.doza.ru/catalog/dosimeters/219/>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 10.12.2020 г.

49 ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1976. – 10 с.

50 ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. – М.: «Нефтяник», 2003. – 38 с.

51 Шведов В.П. Ядерная технология /В.П. Шведов, В.М. Седов. – М.: Атомиздат, 1979. – 336 с.

52 СанПиН 2.6.1.2523-09. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 101 с.

53 СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы. – М.: Роспотребнадзор, 2009. – 100 с.

54 СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/10): Санитарные правила и нормативы. – М.: Роспотребнадзор, 2010. – 84 с.

55 НП 063-05. Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2019. – 27 с.

56 Результаты измерения радионуклидного состава и выгорания высоковыгоревшего топлива ВВЭР-1000 разрушающими методами / Е.Р. Петров, Б.А. Бабичев, В.Д. Домкин и др. – Радиохимия, т. 54, № 4, 2012. – с 348-351.

57 Диев Л.В. Критические параметры делящихся материалов и ядерная безопасность: Справочник / Л.В. Диев, Б.Г. Фязанов, А.П. Мурашов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 176 с.

58 ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.

59 Защита от механического травмирования [Электронный ресурс] / Общие средства и методы. URL: https://studme.org/289987/bzhd/zaschita_mehanicheskogo_travmirovaniya, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 5.11.2020 г.

60 ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2002. – 14 с.

61 ГОСТ 12.1.004–91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2006. – 68 с.

62 СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. – М.: Стандартинформ, 2017. – 106 с.

63 СП 73.13330.2016 Внутренние санитарно-технические системы зданий. – М.: Стандартинформ, 2017. – 39 с.

64 СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01.2003 – М.: Стандартинформ, 2017. – 117 с.

65 Вентилятор двухстороннего всасывания ВР2Н [Электронный ресурс] / Промышленные вентиляторы. URL: https://energo1.com/catalog/ventilyatsionnoe_oborudovanie/ventilyatory_nizkogo_davleniya/ventilyatory_dvukhstoronnego_vsasyvaniya_vr2n/16416/, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 13.01.2020 г.

66 Электродвигатель АИР132М4 [Электронный ресурс] / Промышленное электрооборудование. URL: http://www.esbk.ru/products_info/ed/101_ed_as_obprom/elektrodivigatel_air_132m4.html, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 13.01.2020 г.

67 СанПиН 2.2.4548–96 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Минздрав России, 1997. – 14 с.

Список использованных источников

- 1 Землянухин В.И. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС / В.И. Землянухин, Е.И. Ильенко, А.Н. Кондратьев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
- 2 Расчет SF-коэффициентов для продуктов деления в топливе топливного реактора ВВЭР-1000 / Э.А. Рудак, О.И. Ячник, Н.В. Максименко, В.В. Андреев. – Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого № 4, 2010. – 45-53 с.
- 3 Громов Б.В. Химическая технология облученного ядерного топлива: учебник для вузов / Б.В. Громов, В.И. Савельева, В.Б. Шевченко. – М.: Энергоатомиздат, 1983, - 352 с. с ил.
- 4 Исследование процесса окисления ОЯТ при повышенной температуре / В.И. Мацеля и др.; науч. рук. И.И. Жерин. – Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – 201 с.
- 5 Способ окислительной обработки (волоксидации) облученного ядерного топлива / Патент России № 2654536. 2018. Бюл. № 15. / П.М. Гаврилов, И.А. Меркулов, Д.В. Друзь и др.
- 6 Термохимическое охрупчивание циркониевой оболочки твэла и окислительная перекристаллизация топливной композиции при переработке ОЯТ / М.М. Металиди, С.В. Шаповалов, Р.В. Исмаилов и др. – Радиохимия, т. 57, № 1, 2015. – с 86-89.
- 7 Карелин В.А. Технология переработки облученного ядерного топлива: учебное пособие / В.А. Карелин, А.Н. Страшко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – 89 с.
- 8 Опытнo-демонстрационный центр ГХК: задачи, технологии, перспективы [Электронный ресурс] / Атомная энергия 2.0. URL:

<https://www.atomic-energy.ru/technology/33473>, свободный, - Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 21.10.2020 г.

9 Сударикиов Б.Н. Процессы и аппараты урановых производств. Под ред. д.т.н. Б.В. Громова / Б.Н. Сударикиов, Э.Г. Раков. – М.: «Машиностроение», 1969. – 366 с.

10 Исламов М.Ш. Печи химической промышленности. Изд. 2-е, пер. и доп. / М.Ш. Исламов. – М.: Химия, 1975 г. – 432 с.

11 Элементный и изотопный состав ОЯТ [Электронный ресурс] / Лекции И.Н. Бекмана. URL: http://profbeckman.narod.ru/RH0.files/26_4.pdf, свободный. Яз. рус. Дата обращения 21.10.2020.

12 Вдовенко В.М. Химия урана и трансураниевых элементов / В.М. Вдовенко. – Ленинград: Изд-во академии наук СССР, 1960. – 700 с.

13 Вейгель Ф. Химия актиноидов, в 3 т. Том 2 / Ф. Вейгель, Д. Кац, Г. Сиборг и др. – М.: Мир, 1997. – 654 с.

14 Плотность, теплопроводность, теплоемкость кислорода [Электронный ресурс] / Справочные данные. URL: <http://thermalinfo.ru/svojstva-gazov/neorganicheskie-gazy/plotnost-teploprovodnost-teploemkost-kisloroda>, свободный. Яз. рус. Дата обращения 22.10.2020 г.

15 Химический состав воздуха и его влияние на организм [Электронный ресурс] / Справочник. URL: https://spravochnick.ru/medicina/himicheskiy_sostav_vozduha_i_ego_vliyanie_na_organizm/, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 22.10.2020 г.

16 Физические свойства воздуха: плотность, вязкость, удельная теплоемкость [Электронный ресурс] / Справочные данные. URL: <http://thermalinfo.ru/svojstva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svojstva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 22.10.2020 г.

17 Плотность азота, свойства жидкого и газообразного N₂ [Электронный ресурс] / Справочные данные. URL: <http://thermalinfo.ru/svojstva->

gazov/neorganicheskie-gazy/plotnost-i-svoystva-azota-teploprovodnost-azota-n2,

свободный. Яз. рус. Дата обращения: 22.10.2020 г.

18 База данных физико-химических свойств и синтезов веществ [Электронный ресурс] / База данных. URL: <http://chemister.ru/Database/search.php>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 24.10.2020 г.

19 ГОСТ 13268-88. Электронагреватели трубчатые. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 15 с.

20 ГОСТ 9931-85. Корпуса цилиндрические стальных сварных аппаратов и сосудов. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 23 с.

21 ГОСТ 6636-69. Основные нормы взаимозаменяемости. – М.: Издательство стандартов, 1970. – 8 с.

22 ГОСТ 12620-78. Днища конические неотбортованные с углами при вершине 60, 90 и 120°. Основные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 33 с.

23 Расчет шнекового транспортера: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Оборудование производств редких элементов» для студентов IV курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики / сост. Тураев Н.С., Брус И.Д., Кантаев А.С.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 17 с.

24 ГОСТ 5949-2018.Metalлопродукция из сталей нержавеющей и сплавов на железоникелевой основе коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018. – 32 с.

25 АТК 24.200.03-90. Опоры-стойки вертикальных аппаратов. – М.: Издание официальное. – 13 с.

26 ТВС реактора ВВЭР-1000 [Электронный ресурс] / Ядерная физика. URL: <https://sites.google.com/site/alexianon/chtivo/nuclear/tvs-reaktora-vver-1000>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 25.10.2020 г.

27 Способ нагрева потока воздуха и устройство / Патент России № 2280821. F24H 3/04 / Ю.Л. Котельников, А.Л. Семёнов, Н.М. Белянин и др.

28 Пневмотранспорт сыпучих материалов [Электронный ресурс] / Описание решения. URL: <https://www.air-energy.ru/industries/kompressory/pnevмотransport-sypuchikh-materialov/>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 27.10.2020 г.

29 Выбор и расчет средств по пылегазоочистке воздуха: Методические указания к практической работе по курсу «Безопасность жизнедеятельности» / сост. А.А. Волкова, Е.В. Шашмурина; Уральский государственный технический университет. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – 16 с.

30 Габаритные размеры циклонов [Электронный ресурс] / Промышленное оборудование. URL: http://www.pritok44.ru/prod/cikloni_cn-11/gabaritnie_razm, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 29.10.2020 г.

31 Аппаратурное обеспечение систем газоочистки гидromеталлургических операций переработки облученного топлива / О.А. Устинов, А.Ю. Шадрин, С.А. Якунин и др. – Вопросы атомной науки и техники, № 2, 2018. – с. 82-95.

32 Фильтры для очистки газов от радиоактивных аэрозолей [Электронный ресурс] / Каталог продукции. URL: <https://centrotech.ru/catalog/filters/filtry-dlya-ochistki-gazov-ot-radioakt/>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 10.11.2020 г.

33 Скруббер [Электронный ресурс] / Насадочные скрубберы. URL: <https://plast-product.ru/skrubber/#z4>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 11.11.2020 г.

34 НП 013-99. Установки по переработке отработавшего ядерного топлива. Требования безопасности. – М. Госатомнадзор России, 1999. – 16 с.

35 Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: Справочник / А.И. Ящура. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 360 с

36 Черняк Т.В. Управление кадровыми ресурсами на современном предприятии. – Новосибирск: СибАГС, 2006, – 168 с.

37 Техничко-экономическое обоснование проектирования цеха химического производства: Учебное пособие / Е.Л. Бойцова, Ф.А. Ворошилов, Е.В. Меньшикова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – 85 с.

38 Голубятников В.А. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности / В.А. Голубятников, В.В. Шувалов – М.: «Химия», 1985. – 350 с.

39 Мелюшев Ю.К. Основы автоматизации химических производств и техника вычислений. 2-е изд., перераб и доп. – М.: Химия, 1982.

40 Вихревой расходомер ЭМИС-вихрь 200 [Электронный ресурс] / Измерение расхода газа, пара, жидкости. URL: http://emis-kip.ru/ru/prod/vihrevoj_rashodomer/, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 15.11.2020 г.

41 Преобразователи частоты Siemens Sinamics G 110 [Электронный ресурс] / «МехПривод». URL: <http://www.mechprivod.ru/katalog/preobrazovateli-chastoty/siemens/sinamics-g-110.html>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 16.11.2020 г.

42 Ультразвуковые уровнемеры для жидкостей и сыпучих продуктов [Электронный ресурс] / Индуктивный датчик – техническая спецификация. URL: <http://www.ste.ru/krohne/optisound1.html>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 17.11.2020 г.

43 Датчик температуры для плоской поверхности [Электронный ресурс] / Компания «Vec-ing». URL: <http://www.vec-ing.ru/?do=menu&id=48848>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 19.11.2020 г.

44 АО научно-производственное предприятие Эталон [Электронный ресурс] / Информационный портал. – URL: <https://www.tdetalon.com/termopreobrazovateli-soprotivleniya/platinovye/tsp->

0303-termopreobrazovately-soprotivleniya/, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 24.11.2020.

45 LiveDrive [Электронный ресурс] / Датчики давления для высоких температур. – URL: <https://linedrive.ru/catalogue/sensors/melt/kn/>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 25.11.2020 г.

46 Расходомер-счетчик [Электронный ресурс] / Ультразвуковой расходомер Prosonic Flow 92F. URL: <https://www.ru.endress.com/ru/Tailor-made-field-instrumentation/Flow-measurement-product-overview/ultrazvukovoj-rasxodomer-Prosonic-Flow-92F>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 27.11.2020 г.

47 Поточный нефелометр AquaScat S (in-line) [Электронный ресурс] / Автоматический контроль мутности и взвешенных частиц в жидкостях. URL: <https://www.sigrist.ru/catalog/avtomaticheskij-kontrol-mutnosti-i-vzveshennykh-chastits-v-zhidkostyakh/potochnyy-nefelometr-aquascats-in-line/>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 1.12.2020 г.

48 Оборудование радиационного контроля [Электронный ресурс] / Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения. URL: <http://www.doza.ru/catalog/dosimeters/219/>, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 10.12.2020 г.

49 ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1976. – 10 с.

50 ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. – М.: «Нефтяник», 2003. – 38 с.

51 Шведов В.П. Ядерная технология /В.П. Шведов, В.М. Седов. – М.: Атомиздат, 1979. – 336 с.

52 СанПиН 2.6.1.2523-09. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 101 с.

53 СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы. – М.: Роспотребнадзор, 2009. – 100 с.

54 СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/10): Санитарные правила и нормативы. – М.: Роспотребнадзор, 2010. – 84 с.

55 НП 063-05. Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2019. – 27 с.

56 Результаты измерения радионуклидного состава и выгорания высоковыгоревшего топлива ВВЭР-1000 разрушающими методами / Е.Р. Петров, Б.А. Бабичев, В.Д. Домкин и др. – Радиохимия, т. 54, № 4, 2012. – с 348-351.

57 Диев Л.В. Критические параметры делящихся материалов и ядерная безопасность: Справочник / Л.В. Диев, Б.Г. Фязанов, А.П. Мурашов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 176 с.

58 ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.

59 Защита от механического травмирования [Электронный ресурс] / Общие средства и методы. URL: https://studme.org/289987/bzhd/zaschita_mehanicheskogo_travmirovaniya, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 5.11.2020 г.

60 ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2002. – 14 с.

61 ГОСТ 12.1.004–91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2006. – 68 с.

62 СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. – М.: Стандартинформ, 2017. – 106 с.

63 СП 73.13330.2016 Внутренние санитарно-технические системы зданий. – М.: Стандартинформ, 2017. – 39 с.

64 СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01.2003 – М.: Стандартинформ, 2017. – 117 с.

65 Вентилятор двухстороннего всасывания ВР2Н [Электронный ресурс] / Промышленные вентиляторы. URL: https://energo1.com/catalog/ventilyatsionnoe_oborudovanie/ventilyatory_nizkogo_davleniya/ventilyatory_dvukhstoronnego_vsasyvaniya_vr2n/16416/, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 13.01.2020 г.

66 Электродвигатель АИР132М4 [Электронный ресурс] / Промышленное электрооборудование. URL: http://www.esbk.ru/products_info/ed/101_ed_as_obprom/elektrodivigatel_air_132m4.html, свободный. Яз. рус. Дата обращения: 13.01.2020 г.

67 СанПиН 2.2.4548–96 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Минздрав России, 1997. – 14 с.